

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 621.38

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри



С.А. Найда

(ініціали, прізвище)

“ 14 ”

травня

2023 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації)

171 Електроніка

(код і назва спеціальності)

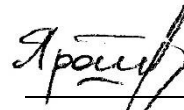
на тему: Моделювання параметрів мережі LoRa з урахуванням особливостей апаратного забезпечення

Виконав: студент II курсу, групи ДВ-11мн

(шифр групи)

Ярошенко Роман Олексійович

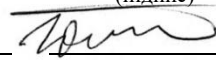
(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н., Онікієнко Ю. О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)



(підпис)

Консультант

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рецензент доцент каф. ЕІ, к.т.н., доц. Іванько К.О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)



(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент



(підпис)

Київ – 2023 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроніки
(повна назва)

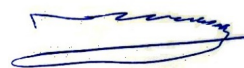
Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (освітня програма) 171 Електроніка (Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей)
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



С.А. Найда
(ініціали, прізвище)

«01» 02 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Ярошенку Роману Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Моделювання параметрів мережі LoRa з урахуванням особливостей апаратного забезпечення»

науковий керівник дисертації Онiкiєнко Юрiй Олексiйович, доцент, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «23» березня 2023 р. № 1310-с

2. Строк подання студентом дисертації 16.05.2023 р.

3. Об'єкт дослідження: –технологія Інтернету речей LoRa, програмний пакет, що надає змогу розрахувати параметри мережі та параметри мережі, OMNeT++.

4. Предмет дослідження (Початкові дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою): моделі поширення сигналів Фріїса та Log Normal Shadowing Model, програмне забезпечення OMNeT++, пакет FLoRa.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1)Розгляд безпроводових сенсорних мереж

2) Огляд та аналіз моделей загасання сигналів 3)Проведення експериментальних досліджень з подальшим аналізом отриманих результатів 4) Моделювання RSSI з використанням ПЗ

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 1 презентація 12 слайдів.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1) Yurii Onykiienko; Pavlo Popovych; Anastasiia Mitsukova; Anna Beldyagina; Roman Yaroshenko LoRa Evaluation for University Campus in Urban Conditions 2021 IEEE 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT) 2) Yurii Onykiienko; Pavlo Popovych; Roman Yaroshenko; Anastasiia Mitsukova; Anna Beldyagina; Yuliia Makarenko Using RSSI Data for LoRa Network Path Loss Modeling IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) 2022

8. Дата видачі завдання 20.02.2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Написання першого розділу:	09.04.2023	виконано
2	Написання другого розділу:	16.04.2023	виконано
3	Написання третього розділу	26.04.2023	виконано
4	Написання четвертого розділу	12.05.2023	виконано
5	Підготовка матеріалів до друку та оформлення пояснювальної записки	13.05.2023	виконано
6	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	19.05.2023	виконано

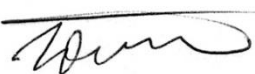
Студент



Р. О. Ярошенко

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник



(підпис)

Ю. О. Онікієнко

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Ярошенко Р. О. «Моделювання параметрів мережі LoRa з урахуванням особливостей апаратного забезпечення»: магістерська дисертація: 171 Електроніка. - КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2023. - 70 с.

Магістерська дисертація: 70 с., 35 рис., 5 табл. , 3 дод., 38 джерел.

Ключові слова Propagation losses, LoRaWAN, LoRa, RSSI, OMNet++.

Актуальність дослідження. Використання мереж LoRaWAN у світі збільшується. Тому необхідно удосконалювати засоби моделювання та проектування таких мереж. В роботі розглянуто похибки моделювання втрат сигналу в мережі LoRaWAN та запропоновано засоби їх усунення.

Метою дослідження є моделювання параметрів мережі LoRaWAN з урахуванням особливостей апаратного забезпечення, що підвищить якість проектування мережі та забезпечить максимальну ефективність та надійність передачі даних.

Об'єкт дослідження – Параметри сигналів радіочастотних технологій Інтернету речей.

Предмет дослідження – рівні сигналів в мережі LoRaWAN .

Методи дослідження – експериментальне дослідження рівнів прийнятих сигналів за допомогою Received Signal Strength Indicator (RSSI).

Наукова новизна отриманих результатів: На основі експериментальних даних отримано коефіцієнти, що дозволяють підвищити точність моделювання загасання сигналу в мереж LoRaWAN на основі RSSI.

Практичне значення одержаних результатів: Отримані результати можуть бути використані для проектування мереж LoRaWAN.

Апробація результатів дисертації: Доповідь на 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology, October 10-14, 2022, Kyiv, Ukraine.

ABSTRACT

Yaroshenko R. O. "Modeling of LoRa network parameters taking into account hardware features": master's thesis: 171 Electronics. - Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 2023. - 70 p.

Master's dissertation: 70 pages, 35 figures, 5 tables, 38 sources.

Keywords: Propagation losses, LoRaWAN, LoRa, RSSI, OMNet++.

Relevance of research. The use of LoRaWAN networks in the world is increasing. Therefore, it is necessary to improve the means of modeling and designing such networks. The work examines the errors of signal loss modeling in the LoRaWAN network and suggests ways to eliminate them.

The purpose of the study is to model LoRaWAN network parameters taking into account hardware features, which will increase the quality of network design and ensure maximum efficiency and reliability of data transmission.

The object of the study is the parameters of the signals of the radio frequency technologies of the Internet of Things.

The subject of the study is signal levels in the LoRaWAN network.

Research methods – experimental study of received signal levels using the Received Signal Strength Indicator (RSSI).

Scientific novelty of the obtained results: On the basis of experimental data, coefficients were obtained that allow to increase the accuracy of modeling of signal attenuation in LoRaWAN networks based on RSSI.

Practical significance of the obtained results: The obtained results can be used for the design of LoRaWAN networks.

Approbation of dissertation results: Report at the 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology, October 10-14, 2022, Kyiv, Ukraine.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕРЕЖ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ.....	9
1.1 Мережі передачі даних	9
1.2 Порівняння технологій передавання даних	13
Висновки до розділу.....	16
2. ОГЛЯД МОДЕЛЕЙ ЗАГАСАННЯ СИГНАЛІВ ТА ЙОГО ВИМІРЮВАННЯ.....	17
2.1 Friis Free Space Propagation.....	17
2.2 Log Distance Path Loss or Log Normal Shadowing Model	18
2.3 Індикатор потужності прийнятого сигналу	20
2.4 RSSI та коефіцієнт обладнання у технології LoRa	26
Висновки до розділу.....	28
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ ЇХ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	29
3.1 Мета експерименту	29
3.2 Обладнання для експерименту	29
3.2.1 Сімейство трансиверів LoRa	29
3.3 Результати експерименту	35
Висновки до розділу.....	40
4 МОДЕЛЮВАННЯ RSSI З ВИКОРИСТАННЯМ ПЗ	41
4.1 Програмне забезпечення для симуляції мережі LoRaWAN	41
4.2 Програмний пакет OMNeT++	44
4.3 Приклад моделювання ticotoc мережі	46
4.4 Короткий опис симуляційної моделі FLoRa.....	50
4.5 Модифікація коду симуляції	54
4.6 Результати симуляції.....	54
Висновки до розділу.....	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

IoT	– Internet of Things
LPWAN	– Low-power wide-area network (мережа великого радіусу з низьким енергоспоживанням)
LoRaWAN	– Long Range wide-area network
LoRa	Long Range
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RSS	Received Signal Strength
OSI	Open Systems Interconnection model
WSN	Wireless Sensor Network
BCM	Безпроводова сенсорна мережа
BC	Базова станція
WLAN	wireless local area network
LOS	line-of-sight
FSPL	Free-space path loss
PL	path loss
MSE	mean squared error
SNR	signal-to-noise ratio
HF	High frequency
LF	Low frequency
BW	Bandwidth
CR	Coding Rate
SF	spreading factors
FSK	Frequency Shift Keying
CRC	Cyclic redundancy check
MAC	Medium access control
ADR	Adaptive Data Rate

ВСТУП

Одна із складових IoT це радіочастотні технології найбільш зараз популярні технології Мережі низького споживання енергії та великої дальності роботи до них відносяться мережі LPWAN.

Мережа LoRaWAN одна з найпопулярніших технологій бездротового зв'язку, яка забезпечує дальню та ефективну передачу даних на великі відстані з мінімальним споживанням енергії. Однак, для того, щоб забезпечити оптимальну роботу мережі LoRaWAN, необхідно враховувати особливості апаратного забезпечення, яке використовується.

Дослідження та моделювання параметрів мережі LoRaWAN за технологією LoRa з урахуванням особливостей апаратного забезпечення дозволить покращити роботу мережі та забезпечити максимальну ефективність та надійність передачі даних. Моделювання зменшить витрат часу та коштів.

Трансивери LoRa мають вбудований блок для вимірювання рівня прийнятого сигналу він називається RSSI. Використання RSSI значно спрощує процес вимірювання затухання прийнятого сигналу, однак наразі такий метод має велику похибку через те що різні трансивери мають різні характеристики RSSI.

Метою роботи є експериментальне дослідження рівнів сигналів в мережі LoRa за допомогою RSSI для визначення похибки такого вимірювання у порівнянні з теоретично розрахованими значеннями.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕРЕЖ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

1.1 Мережі передачі даних

Мережа складається з двох або більше комп'ютерів, які об'єднані для спільного використання ресурсів (наприклад, принтерів і компакт-дисків), обміну файлами або забезпечення електронного зв'язку. Комп'ютери в мережі можуть бути з'єднані за допомогою кабелів, телефонних ліній, радіохвиль, супутників або інфрачервоних променів. [1].

Режим передачі даних визначає напрямок потоку інформації між двома пристроями зв'язку. Його також називають режимом передачі даних або спрямованим режимом. Він визначає напрямок потоку інформації з одного місця в інше в мережі.

У моделі рівня взаємозв'язку відкритої системи (OSI) фізичний рівень призначений для передачі даних у мережі. Він головним чином визначає напрямок даних, у якому дані повинні переміщатися, щоб досягти системи або вузла приймача.

- Залежно від напрямку обміну інформацією режими передачі даних можна охарактеризувати трьома типами:
 - Симплекс;
 - Напівдуплекс;
 - Повний дуплекс.
- Режими передачі даних можна охарактеризувати наступними двома типами на основі синхронізації між передавачем і приймачем:
 - Синхронний;
 - Асинхронний.
- Режими передачі даних можна охарактеризувати наступними двома типами на основі кількості бітів, які одночасно надсилаються в мережі:
 - Послідовний;
 - Паралельний [2].

Дане дослідження зосереджене на бездротовій сенсорній мережі (WSN) – бездротова мережа без інфраструктури, розгорнута у великій кількості бездротових датчиків у спеціальний спосіб, який використовується для моніторингу системи, фізичних умов або умов навколишнього середовища (рис.1.1).

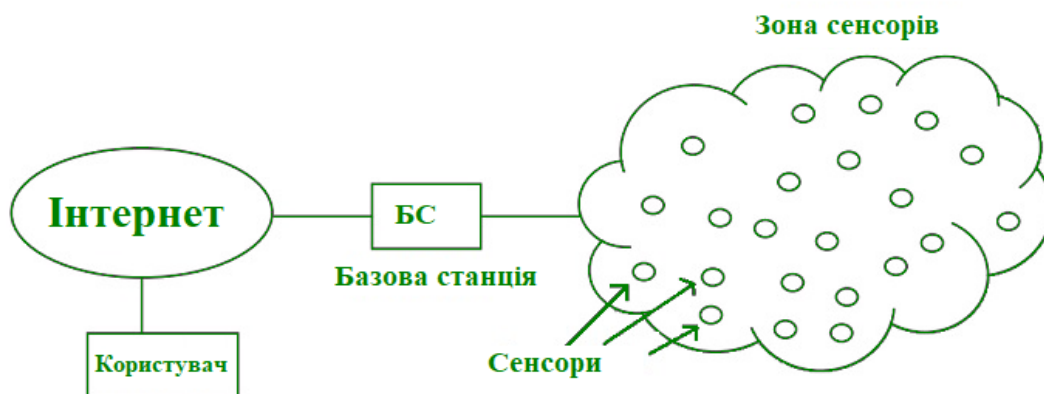


Рисунок 1.1 – Схематичний вигляд БСМ

Сенсорні вузли використовуються в WSN із вбудованим процесором, який керує та контролює середовище в певній зоні. Вони підключені до базової станції, яка діє як блок обробки в системі WSN.

Базова станція в системі WSN підключена через Інтернет для обміну даними. WSN можна використовувати для обробки, аналізу, зберігання та видобутку даних.

Застосування WSN:

- Інтернет речей (IoT);
- Спостереження та моніторинг для безпеки, виявлення загроз;
- Температура навколишнього середовища, вологість і тиск повітря;
- Рівень шуму навколишнього середовища;
- Медичні програми, такі як моніторинг пацієнтів;
- Сільське господарство;
- Виявлення зсувів.

Виклики що постають перед WSN:

- Якість обслуговування;
- Питання безпеки;
- Енергоефективність;

- Пропускна здатність мережі;
- Продуктивність;
- Здатність справлятися з поломкою вузла;
- Міжшарова оптимізація;
- Можливість масштабування до великого масштабу розгортання.

Сучасна бездротова сенсорна мережа (WSN) стикається з кількома проблемами, зокрема:

Обмежена потужність і енергія: WSN зазвичай складаються з датчиків, що живляться від батарей і мають обмежені енергетичні ресурси. Через це важко забезпечити тривалу роботу мережі без необхідності часткої заміни батареї;

Обмежені можливості обробки та зберігання: Сенсорні вузли в WSN зазвичай невеликі та мають обмежені можливості обробки та зберігання. Це ускладнює виконання складних завдань або зберігання великих обсягів даних;

Неоднорідність: WSN часто складаються з безлічі різних типів датчиків і вузлів з різними можливостями. Це ускладнює забезпечення функціонування мережі;

Безпека: мережі WSN уразливі до різних типів атак, таких як прослуховування, перешкоди та підробка. Забезпечення безпеки мережі та даних, які вона збирає, є серйозною проблемою;

Масштабованість: WSN часто потребують можливість підтримувати велику кількість сенсорних вузлів і обробляти великі обсяги даних. Забезпечення можливості масштабування мережі для задоволення цих вимог є серйозним завданням.

Перешкоди: мережі WSN часто розгортаються в середовищах, де є багато перешкод від інших бездротових пристроїв. Це може ускладнити забезпечення надійного зв'язку між вузлами датчиків.

Надійність: WSN часто використовуються в критично важливих програмах, таких як моніторинг навколишнього середовища або контроль промислових процесів. Забезпечення надійності мережі та її здатності правильно функціонувати за будь-яких умов є серйозною проблемою.

Компоненти WSN:

- Датчики: Датчики в WSN використовуються для захоплення змінних навколишнього середовища та для збору даних. Сигнали датчиків перетворюються в електричні сигнали.
- Радіовузли: використовуються для отримання даних, створених датчиками, і надсилання їх до точки доступу WLAN. Він складається з мікроконтролера, трансивера, зовнішньої пам'яті та джерела живлення.
- Точка доступу WLAN: вона отримує дані, які надсилаються радіовузлами бездротовим способом, зазвичай через Інтернет.
- Програмне забезпечення для оцінювання: дані, отримані точкою доступу WLAN, обробляються програмним забезпеченням під назвою «Програмне забезпечення для оцінювання» для представлення звіту користувачам для подальшої обробки даних, які можна використовувати для обробки, аналізу, зберігання та аналізу даних.

Переваги бездротових сенсорних мереж (WSN):

- Низька вартість: WSN складаються з невеликих недорогих датчиків, які легко розгортати, що робить їх економічно ефективним рішенням для багатьох застосувань.
- Бездротовий зв'язок: мережі WSN усувають потребу в дротових з'єднаннях, які можуть бути дорогими та складними для встановлення. Бездротовий зв'язок також забезпечує гнучке розгортання та зміну конфігурації мережі.
- Енергоефективність: WSN використовують малопотужні пристрої та протоколи для економії енергії, що забезпечує тривалу роботу без необхідності часткої заміни батарей.
- Масштабованість: WSN можна легко збільшити або зменшити шляхом додавання або видалення датчиків, що робить їх придатними для ряду програм і середовищ.
- Моніторинг у режимі реального часу: WSN забезпечують моніторинг фізичних явищ у навколишньому середовищі в режимі реального часу, надаючи своєчасну інформацію для прийняття рішень і контролю.

Недоліки бездротових сенсорних мереж (WSN):

- Обмежений радіус дії: діапазон бездротового зв'язку в WSN обмежений, що може бути проблемою для великомасштабного розгортання або в середовищах з перешкодами, які перешкоджають радіосигналам.
- Обмежена обчислювальна потужність: WSN використовують малопотужні пристрої, які можуть мати обмежену обчислювальну потужність і пам'ять, що ускладнює виконання складних обчислень або підтримку розширених програм.
- Безпека даних: мережі WSN уразливі до загроз безпеці, таких як прослуховування, втручання та атаки на відмову в обслуговуванні, які можуть поставити під загрозу конфіденційність, цілісність і доступність даних.
- Перешкоди. Бездротовий зв'язок у WSN може бути чутливий до перешкод від інших бездротових пристроїв або радіосигналів, що може погіршити якість передачі даних.
- Проблеми розгортання: розгортання WSN може бути складним через необхідність правильного розміщення датчиків, керування живленням і налаштування мережі, що може потребувати значного часу та ресурсів.

Хоча WSN пропонують багато переваг, вони також мають обмеження та проблеми, які необхідно враховувати під час розгортання та використання їх у реальних програмах [3].

На сьогодні існує великий вибір технологій комунікації між пристроями, що утворюють мережу. Нижче наведено декілька технологій мереж, що активно розвиваються.

1.2 Порівняння технологій передавання даних

Стандарти Інтернету речей, будується на тривалій роботі кінцевих пристроїв від автономних джерел живлення (LPWAN). Основними технологіями на ринку LPWAN є LoRa, NB-IoT та Sigfox. У наведеній таблиці 1.1[4, 5, 6] порівняння основних характеристик даних стандартів.

Таблиця 1.1. Порівняльна таблиця технологій передавання даних у Інтернеті речей

Технічні характеристики	LoRa	NB-IoT	Sigfox
Частотний діапазон	433 МГц; 865 МГц – 867 МГц 868 МГц; 915 МГц; 923 МГц	450 МГц – 3,5 ГГц	868 МГц (Європа) 915 МГц (США)
Тип мережі	Асинхронна. UP і DL пакети передаються в одних частотних каналах	Синхронна. Напівдуплексна мережа з частотним поділом UP і DL каналів - HD-FDD	Напівдуплексна
Смуга одного радіоканалу	125кГц – 500 кГц	180кГц	200 кГц
Максимальна потужність випромінювання кінцевого пристрою	14дБм	20дБм (class 5) 23дБм (class 3)	<14 дБм (UL) <27 дБм (DL)
Чутливість приймача базової станції	-137дБм	-141дБм	-126 дБм
Динамічний діапазон	151дБ	161дБ (class 5) 164дБ (class 3)	156 дБ
Модуляція	LoRa	QPSK / BPSK	GFSK/DBPSK
Наявність шифрування	Так	Так	Так

Продовження таблиці 1.

Швидкість передачі даних кінцевим пристроєм	0,3-50 кбіт / с	158.5 кбіт / с (UL), 127 кбіт / с (DL)	ЄС: 100 біт/с (UL) США 600 біт/с (UL) 600 біт/с (DL)
Робота від автономних джерел живлення	~ 10 років	~ 10 років	~ 10 років

З таблиці 1.1 випливає, що технологія LoRa має переваги у смузі одного радіоканалу та має більшу чутливість приймача. Варто зазначити, що дана технологія економічно дешевша у розгортанні, оскільки для NB-IoT потребує для кожного вузла SIM-карти, що збільшує бюджет розгортання, а Sigfox потребує окремих пристроїв для роботи. Головними перевагами LoRa є велика відстань роботи між БС та кінцевими пристроями та можливість роботи при великих рівнях завад.

Висновки до розділу

Мережі передачі даних відіграють вирішальну роль у забезпеченні зв'язку між пристроями Інтернету речей. Серед найпоширеніших з них можна відмітити технології LoRa, NB-IoT та Sigfox.

LoRa – це технологія бездротового зв'язку з низьким енергоспоживанням і великим радіусом дії, яка призначена для підключення пристроїв IoT на великій території. Вона ідеально підходить для додатків, які не потребують високої швидкості передачі даних і вимагають тривалого часу автономної роботи, таких як "розумні міста" або "розумні будинки".

NB-IoT, з іншого боку, є стандартом 3GPP, який працює в ліцензованому спектрі і призначений для забезпечення широкої зони покриття для пристроїв IoT. Він підходить для додатків, які вимагають більш високої швидкості передачі даних і більш надійного захисту, таких як промислова автоматизація та інтелектуальний облік.

Sigfox – ще одна технологія бездротового зв'язку з низьким енергоспоживанням і великим радіусом дії, яка працює в неліцензованому спектрі. Ця технологія є прямим конкурентом технології LoRa, що використовується для додатків, які вимагають низької швидкості передачі даних і тривалого часу автономної роботи.

При порівнянні цих мережі, слід зазначити, що технологія LoRa має кілька переваг над NB-IoT та Sigfox. Вона забезпечує більший радіус дії, ніж NB-IoT, а також пропонує більшу гнучкість і масштабованість, ніж Sigfox. Мережі LoRa також можуть бути розгорнуті в різних середовищах і можуть підтримувати велику кількість пристроїв, що робить їх ідеальними для багатьох додатків IoT. Можна зробити висновок, що всі три розглянуті мережі мають свої переваги і недоліки, проте LoRa є найбільш підходящою для багатьох додатків Інтернету речей.

2. ОГЛЯД МОДЕЛЕЙ ЗАГАСАННЯ СИГНАЛІВ ТА ЙОГО ВИМІРЮВАННЯ

2.1 Friis Free Space Propagation

Модель розповсюдження у вільному просторі Фріїса використовується для моделювання втрат на шляху прямої видимості (LOS – line-of-sight), що виникають у вільному просторі, позбавленому будь-яких об'єктів, які створюють поглинання, дифракцію, відображення або будь-які інші явища, що змінюють характеристики випромінюваної хвилі, але лише в дальній області передавальної антени [7] і базується на законі обернених квадратів відстані, який стверджує, що отримана потужність на певній відстані від передавача спадає на коефіцієнт квадрата відстані.

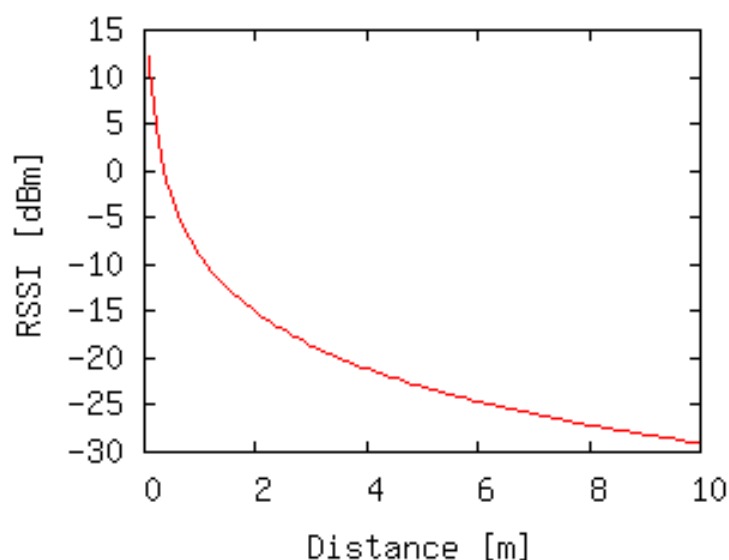


Рисунок 2.1. Залежність RSSI від відстані по моделі Фріїса

Рівняння Фріїса для отриманої потужності задається формулою:

$$P_r(d) = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (1)$$

де P_r – потужність прийнятого сигналу у Вт, виражена як функція відстані (d метрів) між передавачем і приймачем,

P_t – потужність переданого сигналу у Ватах,

G_t і G_r – підсилення передавача і приймачів антени в порівнянні з ізотропним випромінювачем з одиничним підсиленням,

λ – довжина хвилі несучої в метрах,

L – інші втрати, які не пов'язані з втратами при розповсюдженні.

Параметр L може включати втрати в системі, такі як втрати на антені, затухання в лінії передачі, втрати на різних фільтрах тощо. Фактор L зазвичай більше або дорівнює 1, $L=1$ у разі відсутності таких системних втрат.

Втрати на шляху розповсюдження у вільному просторі – це втрати, понесені переданим сигналом під час розповсюдження. Виражається як втрата сигналу між точками живлення двох ізотропних антен у вільному просторі [8].

Значення втрати на шляху вільного простору (FSPL) обчислюється за допомогою формула з [9]:

$$FSPL(dB) = 10 \lg \left[\frac{P_{tx}}{P_{rx}} \right] = -20 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right), \quad (2)$$

де λ – довжина хвилі сигналу,

d – відстань між антенами,

P_{tx} – передана потужність у дБм,

P_{rx} – отримана потужність у дБм.

З іншого боку, вираз для втрат на шляху вільного простору можна представити таким чином:

$$FSPL = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - P_{rx}, \quad (3)$$

де G_{tx} , G_{rx} – підсилення антени передавача та приймача відповідно [10].

2.2 Log Distance Path Loss or Log Normal Shadowing Model

Модель втрат на шляху логарифмічної відстані є розширенням моделі вільного простору Фрііса. Вона використовується для прогнозування втрат при розповсюдженні для широкого діапазону середовищ, тоді як модель вільного простору Фрііса обмежена безперешкодним вільним шляхом між передавачем і

приймачем. Модель охоплює випадкові ефекти затінення через блокування сигналу пагорбами, деревами, будівлями тощо. Її також називають моделлю звичайного затінення.

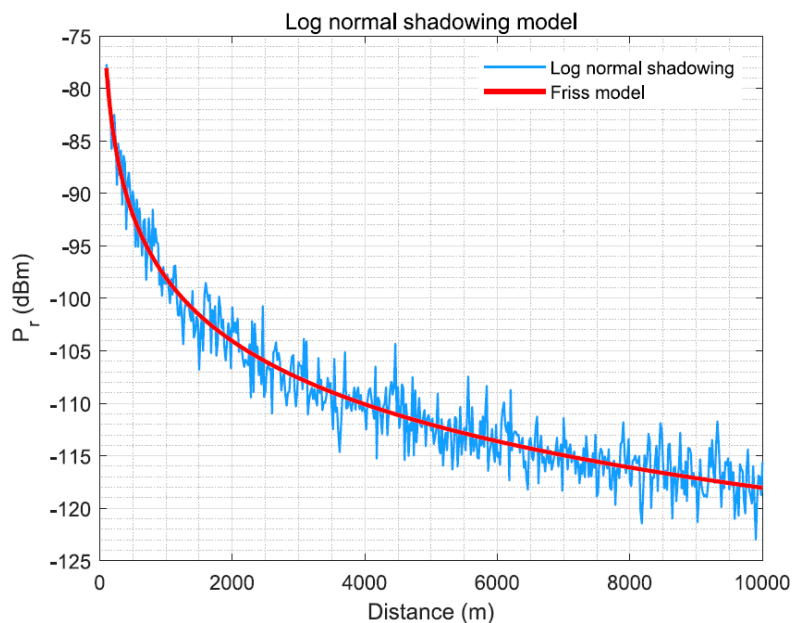


Рисунок 2.2 – Результати моделювання для моделі втрат на шляху логарифмічної відстані

У зоні дальнього поля передавача, на відстані за межами d_f , якщо $P_L(d_0)$ це втрати на шляху на відстані d_0 метрів від передавача, то втрати на шляху на довільній відстані $d > d_0$ [11].

Використовуємо добре відому модель втрат на шляху логарифмічної відстані [12], яка зазвичай використовується для моделювання розгортань у забудованих і густонаселених районах. Цю модель обрано, оскільки вона відповідає середовищам, у яких планується розгортання LoRa. Використовуючи цю модель, втрати на шляху залежно від відстані зв'язку d можна описати як:

$$L_{pl}(d) = \overline{L_{pl}}(d_0) + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (4)$$

де $L_{pl}(d)$ – втрати на шляху в дБ,

$\overline{L_{pl}}(d_0)$ – середній шлях втрати на еталонній відстані d_0 ,

γ – експонента втрат на шляху,

$X_\sigma \sim N(0, \sigma^2)$ – відхилення нормальний розподіл із нульовим середнім значенням,

σ^2 – дисперсія для врахування затінення [13].

Середній шлях втрати на еталонній відстані d_0 у дослідженні дорівнює:

$$\overline{L_{pl}}(d_0) = FSPL + K,$$

де K – коефіцієнт обладнання.

2.3 Індикатор потужності прийнятого сигналу

RSSI – це індикатор рівня потужності, що приймається антеною:

вищий рівень RSSI, сильніший радіосигнал і ближче місце призначення. Як правило, радіокомпонент повідомляє поточне значення RSSI кожного разу, коли надходить дійсний пакет.

Для локалізації в WSN пропонуються інші стратегії, засновані на властивостях розповсюдження радіохвиль. Вони оцінюють відстань, спостерігаючи за часом поширення [14], використовуючи різні радіоінтерфейси [15, 16] і враховуючи або час поширення, або кут прибуття [17].

Однак такі рішення зазвичай вимагають спеціального обладнання та не враховують споживання енергії.

Більшість бездротових пристроїв мають можливість вимірювати потужність отриманого сигналу. Як наслідок, алгоритми локалізації на основі RSSI дуже популярні.

Як правило, потужність сигналу, отриманого датчиком від іншого датчика, розглядається як монотонно спадна функція їх відстані, змодельована рівнянням передачі Фріїса(2) [18].

Однак дослідження [19, 20] показали, що більшість протоколів локалізації, заснованих на RSSI, після розгортання на реальних платформах мають гіршу поведінку, ніж те, що передбачалося моделюванням.

Рівняння Фріїса є ідеальним випадком для точки джерела, і сигнал часто загасає з більшою або повільнішою швидкістю. На практиці важко визначити підсилення антени, тому часто використовується спрощена форма співвідношення між відстанню та потужністю прийому:

$$P_r(D) = P_{r1} - K \cdot \log_{10}(D), \quad (5)$$

де P_{r1} — отримана потужність у дБм на один метр,

K — параметр втрат,

D — відстань між передавачем і приймачем.

Значення P_{r1} і K зазвичай визначають емпірично. Рівняння 5 показано на рисунку 2.3 [21].

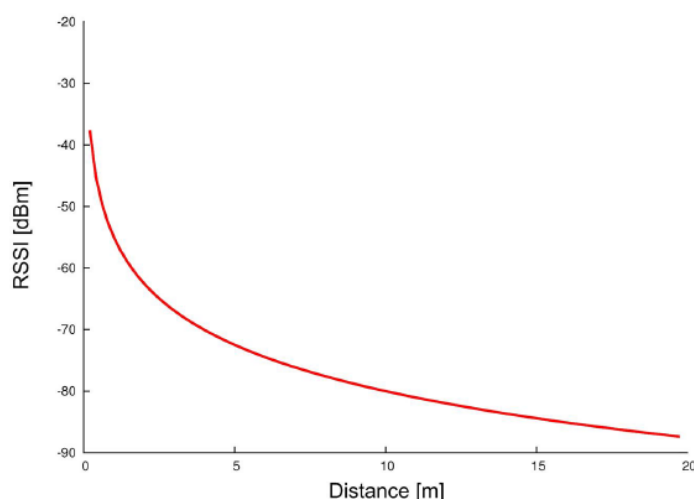


Рисунок 2.3 – Очікувана залежність між RSSI та відстанню ($K = 25$, $P_{r1} = (55 \text{ дБм})$)

Індикатор RSSI більшості вузлових платформ IoT є 8-бітним регістром, який враховує потужність отриманого пакету, усереднену за перші 8 символів (тобто 128 с) [32]. Показання RSSI разом із прив'язкою до відстані, на яких вони були зняті, можна використовувати для отримання моделей втрат на шляху, які кількісно визначають співвідношення між відстанню та потужністю отриманого сигналу. Безперечно, точність отриманих показань RSSI безпосередньо впливає на якість отриманої моделі. Тому, щоб підвищити точність моделі, слід спочатку ідентифікувати кожне джерело неточності, задіяне в процесі вимірювання, і або

уникнути його появи, або зменшити його вплив. З фізичної точки зору, пакет, з якого витягується індикатор RSSI, проходить через елементи зображені на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Елементи, що беруть участь у зчитуванні RSSI.

Пакет створюється у вузлових передавачах IoT відповідно до попередньо визначеного формату кадру. Потім кодується та модулюється завдяки вузловому радіопередавачеві, перетворюючи такий пакет на електромагнітний сигнал. Після того, як сигнал проходить через ряд роз'ємів і електричних шляхів, він випромінюється через антену. ЕМ-хвилі проходять досліджуванним бездротовим середовищем і досягають антени приймача, де процес відбувається у зворотному порядку, доки пакет не буде прочитано приймальною частинкою.

Враховуючи наведені вище елементи, існують наступні джерела потенційних відхилень: два внутрішні фактори, тобто пов'язані з самою платформою IoT і один зовнішній фактор, тобто зовнішній по відношенню до вузлів:

- 1) Специфічна електроніка вузлів (внутрішній фактор). Електроніка приймача (певна потужність прийнятого сигналу, що перетворюється на показання RSSI) та електроніка передавача (співвідношення значення потужності, встановлене на програмному рівні, і фактична потужність переданого пакета)
- 2) З'єднувачі та антени (внутрішній фактор). Додаткові втрати в систему через з'єднувачі та діаграма спрямованості антен.
- 3) Досліджуваний канал (зовнішній фактор). Це має бути єдина змінна в системі, якщо ми хочемо точно оцінити модель втрат на шляху.

Однак, оскільки така модель є спрощенням реального сценарію, необхідно виокремити зв'язок «відстань проти потужності», одночасно мінімізуючи вплив зовнішніх факторів (наприклад, вплив температури, зовнішні перешкоди тощо) [31].

Існує багато робіт, спрямованих на визначення співвідношення між фактичною прийнятою потужністю та зареєстрованим RSSI для різних радіоприймачів [33], [34], [35], наскільки відомо автори цих робіт не повністю ізолювали вплив радіо від впливу навколишнього середовища чи роз'ємів/антен. Більш чітко, досліджувані показники RSSI були отримані шляхом бездротової передачі пакетів, а потім отримання значень RSSI з них. Це призводить до розгляду двох проблем: по-перше, впливом з'єднувачів і антен нехтували (наприклад, діаграми спрямованості антен розглядали як ізотропні), а по-друге, вважалося, що навколишнє середовище демонструє властивості вільного простору (тобто багатопроменевість, завмирання, оклюзії та інші складні явища повністю не враховуються). Щоб впоратися з цими двома аспектами, розроблено та реалізовано експеримент, задуманий для того, щоб справді виділити та виміряти вплив електроніки вузла на показники RSSI.

Результатом цього експерименту є набір кривих, які точно визначають кількісне відношення між потужністю сигналу, що надходить до електроніки вузла, та зареєстрованим значенням RSSI.

Передавач генерує пакет із фіксованою потужністю (визначеною програмним забезпеченням відповідно до інструкцій виробника), який проходить через роз'єм із низькими втратами (з рівною частотною характеристикою в робочій смузі пропускання) і змінний атенюатор.

Після цього сигнал розділяється і проходить двома шляхами: один до аналізатора спектру, а інший - до частинки приймача.

В аналізаторі спектру потужність сигналу наземного істинного сигналу реєструється та порівнюється зі значенням RSSI, яке повідомляє приймаюча частинка, що дає вищезгаданий набір кривих (рис. 2.5) – конкретна конфігурація аналізатора спектру, яка використовується для кожного експерименту.

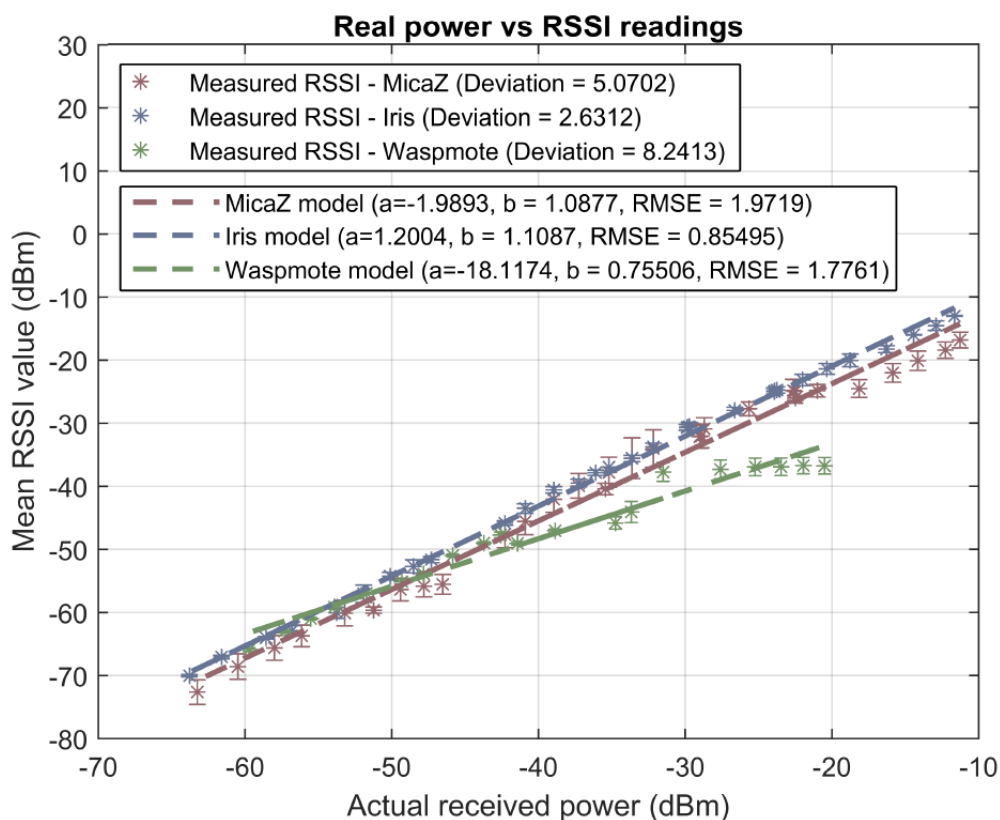


Рисунок 2.5 – Показання RSSI виміряні на приймальній частині проти фактичної отриманої потужності виміряної на аналізаторі спектру для трьох різних платформ.

Поряд із вимірюваннями представлено модель лінійної регресії та оцінено її середньоквадратичну похибку.

Експеримент проводився для трьох різних вузлових-платформ (MicaZ, Iris і Waspote PRO v1.2), кожна з яких оснащена іншим радіоприймачем (TI CC2420, AT86RF230 і Digi XBee s1 відповідно).

Щоб перевірити відмінності між вузлами однієї платформи, аналіз було повторено для трьох вузлів з кожної платформи. Крім того, процедура повторюється для різних значень потужності передачі та ослаблення (останнє встановлюється на змінному атенюаторі). Варто зазначити, що під час обчислення цих співвідношень враховано втрати, які вносять розгалужувач, з'єднувачі та змінний атенюатор. Цей ретельний процес гарантує, що, усуваючи потребу у випромінюванні хвиль, усуне вплив антен/роз'ємів вузлів і неконтрольованих змінних навколишнього середовища на покази RSSI.

Кожну окрему точку на рис. 2.5 було отримано шляхом усереднення 2048 пакетів із 3 різних вузлів кожної платформи (загалом 6144 пакети) – зауважте, що

стандартне відхилення 6144 пакетів також зображено як смуга помилок для кожного окремого значення потужності.

Значення відхилень, показані у верхній лівій легенді, вказують на середню різницю між фактичною прийнятою потужністю (виміряною за допомогою аналізатора спектру) та потужністю, яку повідомляє RSSI; тобто очікувана втрата точності платформи вузла.

Крім того, модель лінійної регресії (6) була підігнана (шляхом мінімізації середньої квадратичної помилки MSE) до отриманих даних.

Ця модель регресії допомагає легко виправляти необроблені показання RSSI, проектуючи їх на фактичні отримані значення потужності; таким чином, отримуємо виправлене значення $RSSI_{corrected}$. Середньоквадратичну помилку (RMSE) моделі також було надано, щоб проілюструвати відповідність моделі (низька середньоквадратична помилка вказує на те, що досягнута адекватна відповідність) [31].

$$RSSI_{RAWreadings} = a + b \cdot RSSI_{corrected}, \quad (6)$$

Стосовно результатів, представлених на рис. 2.5, варто звернути увагу на кілька аспектів. По-перше, дуже важливо висвітлити помітні відмінності між платформами, які в кінцевому підсумку призводять до платформозалежних моделей RSSI. По-друге, розраховані значення відхилення є відносно великими для кожної платформи. Ці два аспекти вказують на те, що без виправлення точність необроблених вимірювань RSSI може бути невідповідною для отримання моделей втрат на шляху для IoT, де точність є обов'язковою. Наприклад, відхилення 5,07 для платформи MicaZ вказує на те, що середнє відхилення заданого показання RSSI від фактичної отриманої потужності становить близько 5 дБ. Нарешті, було доведено, що відносно велике стандартне відхилення (зображене у вигляді смужок похибок) для певних значень потужності виникає внаслідок великої мінливості показань RSSI між частинками однієї платформи, яка може досягати 3,23 дБ у випадку частинок MicaZ. Про це явище також

повідомлялося [36], і воно вносить небажану неточність у похідні моделі, якщо для згладжування цього ефекту не використовуються різні частинки однієї платформи.

2.4 RSSI та коефіцієнт обладнання у технології LoRa

Розглянемо реалізацію RSSI на чипах, що використано у модулях технології LoRa. Зв'язок між RSSI і втратою на шляху є унікальним для кожного типу мікросхеми LoRa. В експериментах використовувалися модулі LoRa на чіпі SX1278 на 433 МГц, на чіпі SX1276 на 868 МГц і на чіпі SX1280 на 2,4 ГГц.

Дані для розрахунку RSSI (PacketRssi) і SNR (PacketSnr) зчитуються з регістрів RegPktRssiValue і RegPktSnrValue мікросхеми SX1278, а значення RSSI обчислюється для частоти 433 МГц за формулою:

$$\text{RSSI (дБм)} = -157 + \text{PacketRssi} + \text{PacketSnr} * 0,25.$$

Для частоти 868 МГц значення RSSI розраховується за такою формулою:

$$\text{RSSI (дБм)} = -164 + \text{PacketRssi} + \text{PacketSnr} * 0,25.$$

Значення RSSI, які повідомляє модем LoRa, відрізняються від тих, які виражає модем FSK/OOK. Наступна формула показує метод, який використовується для інтерпретації значень LoRa RSSI:

(при використанні порту High Frequency (HF))

$$\text{RSSI (дБм)} = -157 + \text{Rssi},$$

Або (при використанні низькочастотного (LF) порту)

$$\text{RSSI (дБм)} = -164 + \text{Rssi},$$

Цю ж формулу можна повторно використати для оцінки потужності сигналу отриманого пакету PS:

(при використанні високочастотного (HF) порту)

$$\text{PS (дБм)} = -157 + \text{Rssi},$$

Або (при використанні низькочастотного (LF) порту)

$$\text{PS (дБм)} = -164 + \text{Rssi}$$

Завдяки характеру модуляції LoRa можна отримувати пакети з нижчим рівнем шуму. У цій ситуації SNR використовується в поєднанні з PacketRssi для обчислення потужності сигналу отриманого пакету:

(при використанні порту HF і $SNR < 0$)

$$\text{Потужність пакета (дБм)} = -157 + \text{PacketRssi} + \text{PacketSnr} * 0,25$$

Або (при використанні порту LF і $SNR < 0$)

$$\text{Рівень пакету (дБм)} = -164 + \text{PacketRssi} + \text{PacketSnr} * 0,25$$

1. PacketRssi (у RegPktRssiValue) — це усереднена версія RSSI (у RegRssiValue). RSSI можна прочитати в будь-який час (під час отримання пакету чи ні), і його слід усереднити, щоб отримати більш точні результати.

2. Константи, -157 і -164, можуть змінюватися залежно від налаштувань інтерфейсу SX1276/77/78/79 (LnaBoost =1 або 0, наявність зовнішнього МШУ, невідповідність на вході МШУ...). Рекомендується регулювати ці значення за допомогою процедури калібрування в одній точці, щоб підвищити точність RSSI.

3. Зі збільшенням потужності сигналу ($RSSI > -100$ дБм) лінійність PacketRssi не гарантується, і результати будуть відрізнятися від ідеальної ідеальної кривої 1 дБ/дБ. Коли потрібна дуже хороша точність RSSI у всьому динамічному діапазоні приймача, пропонуються два варіанти:

- Rssi у RegRssiValue забезпечує кращу лінійність. Rssi може бути відібраний під час отримання корисного навантаження (між ValidHeader і RxDone IRQ) і використаний для отримання вимірювання RSSI з більш високим сигналом.
- Коли $SNR \geq 0$, стандартну формулу можна налаштувати, щоб виправити нахил:
 $RSSI = -157 + 16/15 * \text{PacketRssi}$ (або $RSSI = -164 + 16/15 * \text{PacketRssi}$)

Варто зазначити, що PacketRssi (у RegPktRssiValue) є усередненою версією Rssi (у RegRssiValue). Rssi можна прочитати в будь-який час (під час отримання пакету чи ні), і його слід усереднити, щоб отримати більш точні результати [22].

Отримана потужність P_{rx} залежить від значення співвідношення RSSI та SNR і може виражено як:

$$P_{rx} = RSSI + K, ()$$

де K – зсув, який залежить від характеристик використаної мікросхеми трансивера, частоту та вибрана технологія й її особливості (в нашому випадку LoRa та SF).

Кінцевий вираз для K має такий вигляд:

$$K = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - FSPL - RSSI . ()$$

Таким чином, знаючи коефіцієнт K , вихідна потужність і підсилення антени, можна оцінити вільний простір шляху втрати на основі вимірювань RSSI [10].

Висновки до розділу

Моделювання LPWAN систем потребує спрощення й пришвидшення розробки, оскільки даний сегмент безпроводових мереж швидко розвивається, тому обрано прості й поширені моделі поширення сигналів Log Normal Shadowing Model та Friis Free Space Propagation.

RSSI, що забезпечує значення параметру RSS, є важливим елементом у сучасних трансиверах й використовується для вимірювання значення потужності прийнятого сигналу, але це значення на виході RSSI залежить від виробника мікросхем, що зазначено у підрозділі 2.3, тому запропоновано детально розглянути структуру контролера LoRa, аби точно визначити яким чином вимірюється RSS й знайти коефіцієнт обладнання K , що також залежить від мікросхем, для точного вимірювання потужності отриманого сигналу кінцевим пристроєм від БС. Для цього проведено експеримент описаний у розділі 3.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ ЇХ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Мета експерименту

Ідея дослідження полягає у визначенні коефіцієнта (або зміщення), який відповідає вимірним значенням RSSI конкретного приймача теоретично розрахованим втратам на шляху у вільному просторі. Знаючи таке зміщення, можна визначити реальні втрати на шляху мережі LoRa. Визначення втрат на шляху порівняно з RSSI для мережі LoRa виконується в наступному порядку.

Спочатку вимірюно залежність значень RSSI і SNR від відстані. Далі розраховано залежність втрат на шляху від відстані з урахуванням вихідної потужності передавача та посилення антен. Отримані значення втрат порівнювали з RSSI для тих же відстаней і отримували відповідні зсуви. Експеримент повторювали для трьох частотних діапазонів. Вимірювання проводили на відкритому просторі в полі в межах прямої видимості. Приймач і передавач були встановлені на висоті 1,5 м.

3.2 Обладнання для експерименту

3.2.1 Сімейство трансиверів LoRa

Трансивери SX1276/77/78/79 оснащені модемом великого радіусу дії LoRa®, який забезпечує наддалекий зв'язок із розширеним спектром і високу перешкодостійкість, мінімізуючи споживання струму.

При максимальній швидкості передачі даних LoRa чутливість на 8 дБ краща, ніж FSK, але використання недорогої номенклатури з XTAL LoRa 20 ppm може покращити чутливість приймача більш ніж на 20 дБ порівняно з FSK.

Використовуючи запатентовану техніку модуляції LoRa від Semtech, SX1276/77/78/79 може досягти чутливості понад -148 дБм, використовуючи недорогий кристал і список матеріалів. Висока чутливість у поєднанні з інтегрованим підсилювачем потужності +20 дБм забезпечує найкращий у галузі бюджет зв'язку, що робить його оптимальним для будь-яких застосувань, які вимагають діапазону чи надійності.

LoRa забезпечує значні переваги як у блокуванні, так і в селективності порівняно зі звичайними методами модуляції, вирішуючи традиційний компроміс між діапазоном, стійкістю до перешкод і споживанням енергії.

Для максимальної гнучкості користувач може вибрати ширину смуги модуляції розширеного спектру (BW), коефіцієнт розширення (SF) і коефіцієнт корекції помилок (CR). Ще одна перевага розширеної модуляції полягає в тому, що кожен коефіцієнт розповсюдження є ортогональним - таким чином кілька переданих сигналів можуть займати той самий канал, не створюючи перешкод.

Це також дозволяє просте співіснування з існуючими системами на основі FSK.

Ці пристрої також підтримують режими високої продуктивності (G)FSK для систем, включаючи WMBus, IEEE802.15.4g. SX1276/77/78/79 забезпечують винятковий фазовий шум, вибірковість, лінійність приймача та UHF для значно нижчого споживання струму, ніж конкуруючі пристрої.

Основні характеристики:

- Модем LoRa®
- Максимальний бюджет зв'язку 168 дБ
- +20 дБм - 100 мВт постійний радіочастотний вихід порівняно з напругою живлення
- +14 дБм висока ефективність РА
- Програмований бітрейт до 300 кбіт/с
- Висока чутливість: до -148 дБм
- Куленепробивний передній кінець: ПРЗ = -11 дБм
- Відмінний блокуючий імунітет
- Низький струм прийому 9,9 мА, збереження реєстру 200 нА
- Повністю вбудований синтезатор з роздільною здатністю 61 Гц
- Модуляція FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa® і OOK
- Вбудований бітовий синхронізатор для відновлення годинника
- Виявлення преамбули
- 127 дБ Динамічний діапазон RSSI

- Автоматичне визначення RF і CAD із надшвидким AFC
- Пакетна система до 256 байт із CRC
- Вбудований датчик температури та індикатор низького заряду батареї [22].

Сімейство трансиверів SX1280/1 забезпечує зв'язок на надвеликій відстані в діапазоні 2,4 ГГц з лінійністю, щоб витримувати сильні перешкоди. Це робить їх ідеальним рішенням для міцних і надійних бездротових рішень. Це перша в своєму роді приймально-передавальна мікросхема діапазону ISM, яка інтегрує функцію часу польоту, відкриваючи прикладні рішення для відстеження та локалізації активів у логістичних ланцюгах і людей для безпеки. Ці продукти великого радіусу дії 2,4 ГГц включають кілька фізичних рівнів і модуляцій для оптимізації зв'язку на великій відстані з високою швидкістю передачі даних для відео та програм безпеки. Завдяки високому рівню інтеграції та наднизькому споживанню струму, що дозволяє використовувати мініатюрні батареї, можна легко сконструювати дуже маленькі вироби для носіння. Радіостанція повністю відповідає всім світовим стандартам радіозв'язку 2,4 ГГц, включаючи EN 300 440, FCC CFR 47, частина 15 і японський стандарт ARIB STD-T66. Рівень інтеграції, низьке споживання та функції вимірювання дальності в лінійці продуктів великого радіусу дії 2,4 ГГц забезпечують розширене підключення та надають додаткові функції новому поколінню раніше непідключених пристроїв та програм.

Ключові особливості:

- Трансивер великої дальності 2,4 ГГц
- Висока чутливість, до -132 дБм
- +12,5 дБм, висока ефективність PA
- Низьке енергоспоживання, вбудований DC-DC
- Модуляції з підтримкою LoRa®, FLRC, (G)FSK
- Програмований бітрейт
- Відмінний блокуючий імунітет
- Стандартний і вдосконалений механізм визначення дальності, час польоту
- Сумісність рівня BLE PHY

Низька вартість системи [29]

Під час експериментів використовувалися OLED-модулі TTGO LORA32 868/915Mhz ESP32 LoRa (рис. 3.1) на чіпі SX1276 на частоті 868 МГц. Два таких модуля з акумуляторами, розміщеними в корпусі, використовуються як приймач і передавач. Зміна налаштувань передавача під час вимірювань здійснювалася через вбудований канал Wi-Fi мікроконтролера ESP32. Налаштування приймача були змінені по каналу LoRa.



Рисунок 3.1 – Модуль TTGO LORA32 868/915Mhz ESP32 LoRa

Характеристики модулю TTGO LORA32 868/915Mhz ESP32 LoRa:

- ESP32:
- ЦП: Xtensa 32-Bit LX6 Dual Core
- Тактова частота: від 80 до 240 МГц
- Пам'ять ROM: 448 Кб
- Пам'ять SRAM: 520 Кб
- Флеш-пам'ять: 32 Мб
- Інтерфейс: SD, UART (3 канали), SPI (3 канали), SDIO, I2C (2 канали), I2S (2 канали), IR LED PWM (2 канали) і ШІМ (3 канали);
- GPIO: цифровий ІО (36), АЦП 12 біт (16 каналів), ЦАП 8 біт (2 канали), ємнісний датчик (10 каналів); LNA; WiFi:

- 802.11 b / g / n: від 2,4 до 2,5 ГГц
- Передача даних: 150 Мбіт/с @ 11n HT40., 72 Мбіт/с @ 11n HT20, 54 Мбіт/с @ 11g, 11 Мбіт/с @ 11b
- Потужність передачі: 19,5 дБм @ 11b, 16,5 дБм @ 11g, 15,5 дБм @ 11n
- Чутливість: -98 дБм
- Безпека WiFi: WPA / WPA2 / WPA2-Enterprise / WPS;
- Cripto WiFi: AES / RSA / ECC / SHA; Bluetooth:
- 4.2 BR / EDR e BLE (Bluetooth Low Energy) OLED-дисплей:
- синій 0,96” SSD1306 LoRa™:
- Частота: 868 МГц
- Модуляція: FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa TM, OOK
- Чутливість: -139 дБм
- Живлення: 3,3 В ÷ 7 В [30]

Чіп SX1280 призначений для роботи на частотах в діапазоні 2,4 ГГц, як було зазначено вище. На відміну від мікросхем SX127х, вимірювання RSSI виконується командою, яка повертає миттєве RSSI значення `rssiInst` під час отримання пакету. Ця команда дійсна для всіх кадрів, і RSSI оновлюється після кожного отриманого символу. Потужність сигналу розраховується за такою формулою:

$$\text{RSSI (дБм)} = \text{rssiInst} / 2.$$

Для вимірювань на частоті 434 МГц використовувалися трансивери LoRa Ra-02 на базі мікросхеми SX1278. Вимірювання на частоті 2,4 ГГц проводилися за допомогою модуля E28-2G4M12S SX1280 2,4 ГГц. Модулі на 434 МГц і 2,4 ГГц разом з платою управління були встановлені в одному корпусі. На платі управління є мікроконтролер ESP32, OLED-індикатор і акумулятор. Один блок модулів використовувався як приймач, інший – як передавач. Зміна налаштувань проводилася так само, як і для модуля 868 МГц. Зовнішній вигляд модулів показаний на рис. 3.2. Усі антени є всенаправленими та вертикально поляризованими.

Під час вимірювання було передано 100 пакетів з десяти байтів корисного навантаження та 12 символів довжини преамбули на кожній із заданих відстаней. У кожній точці та для кожної з частот оцінювали вплив коефіцієнта розповсюдження.

Щоб оцінити вплив цього параметра на рівень RSSI, значення SF були встановлені на 7, 9 і 12. Оскільки параметри приймача передавалися по каналу LoRa, була застосована додаткова процедура CRC для усунення помилок під час налаштування параметрів для пакета налаштування.



Рисунок 3.2 – Модулі LoRa використаний у експерименті

Всі отримані дані записувалися в пам'ять приймача. Значення RSSI і SNR вимірювалися для 433 МГц, 868 МГц і 2,4 ГГц після кожного отриманого пакету, а також записувалися в пам'ять приймача.

Значення основних параметрів трансиверів, які використовувалися в дослідженні, наведено в табл.3.1

Таблиця 3.1. Основні параметри приймопередачів, використаних в експерименті

Частота	433 МГц	868 МГц	2.4 ГГц
Фактор поширення (SF)	7, 9, 12	7, 9, 12	7, 9, 12
Пропускна здатність (BW)	125 кГц	125 кГц	812.5 кГц
Швидкість кодування (CR)	4/5	4/5	4/5
Потужність передачі (TP)	17 дБм	17 дБм	10 дБм
Посилення антени (AG)	2.5 дБі	2 дБі	3 дБі
Чип (Chip)	SX1276	SX1278	SX1280

3.3 Результати експерименту

На рисунках 3.3 – 3.8 показані графіки значень RSSI і K, розрахованих за формулою (4), від відстані для різних значень SF та різних частот. Вимірювання проводилися на відкритому просторі в полі, далеко від джерел радіоперешкод (таких як базові станції мобільного зв'язку).

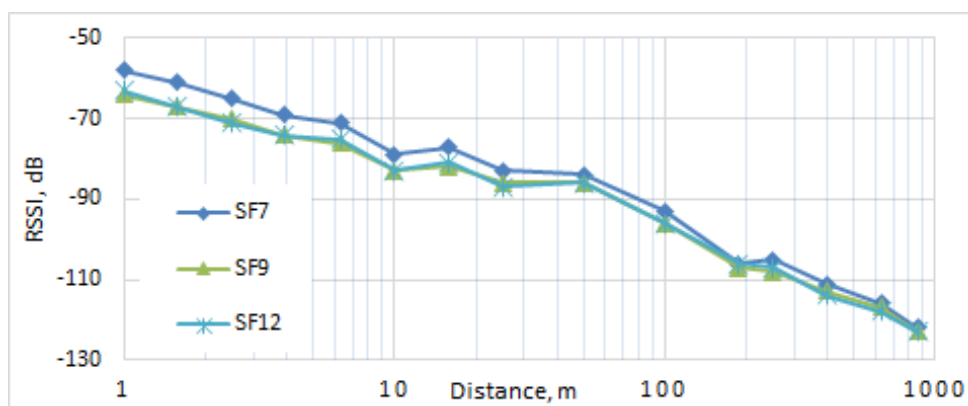


Рисунок 3.3 – Залежність значень RSSI від відстані на частоті 868 МГц

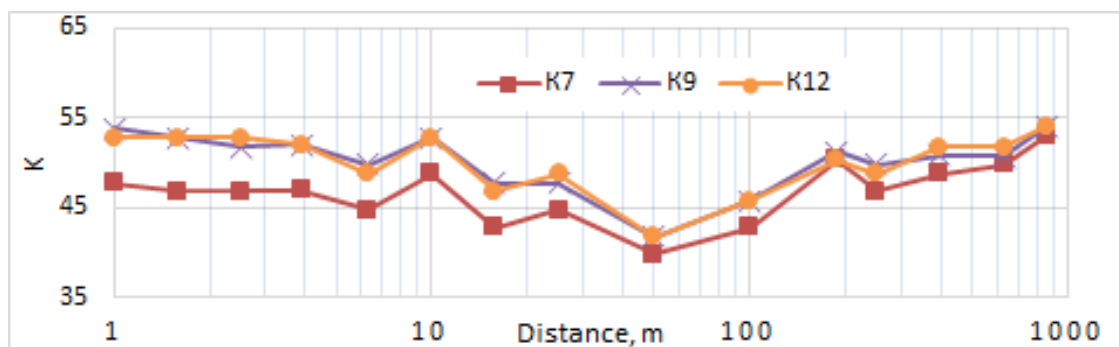


Рисунок 3.4 – Значення коефіцієнта K для 868 МГц та різних значень SF

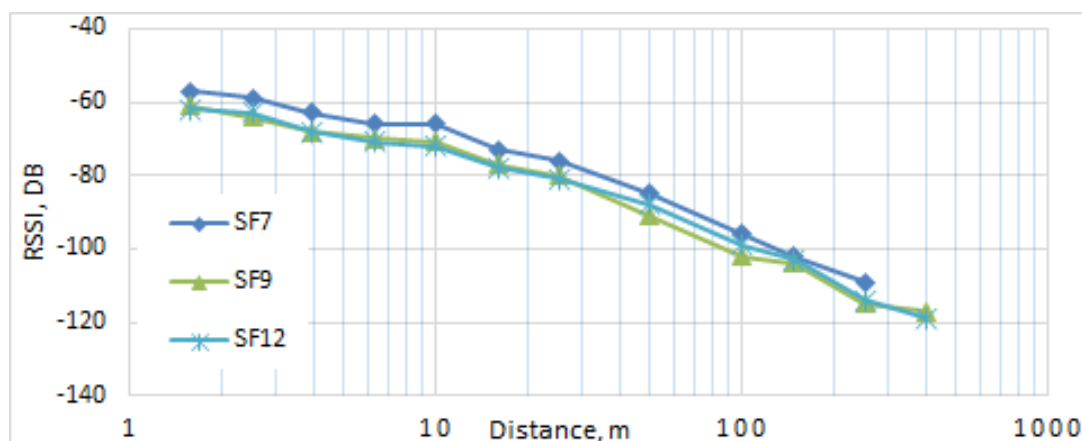


Рисунок 3.5 – Залежність значень RSSI від відстані на частоті 433 МГц

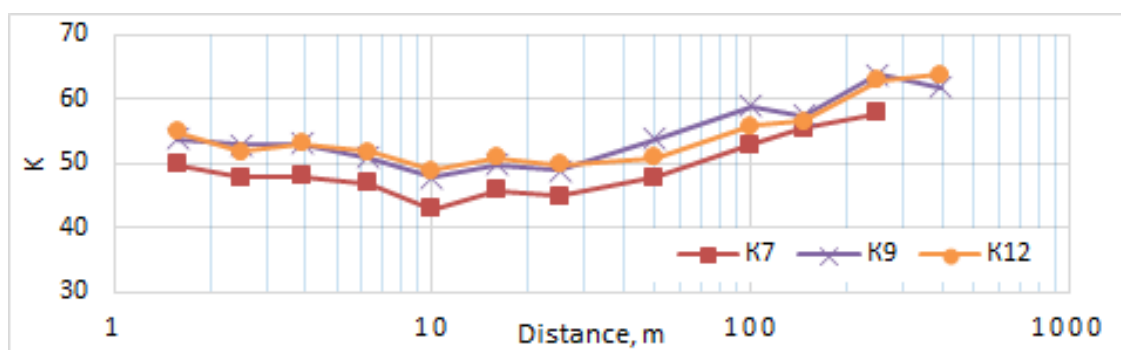


Рисунок 3.6 – Значення коефіцієнта K для 433 МГц та різних значень SF.

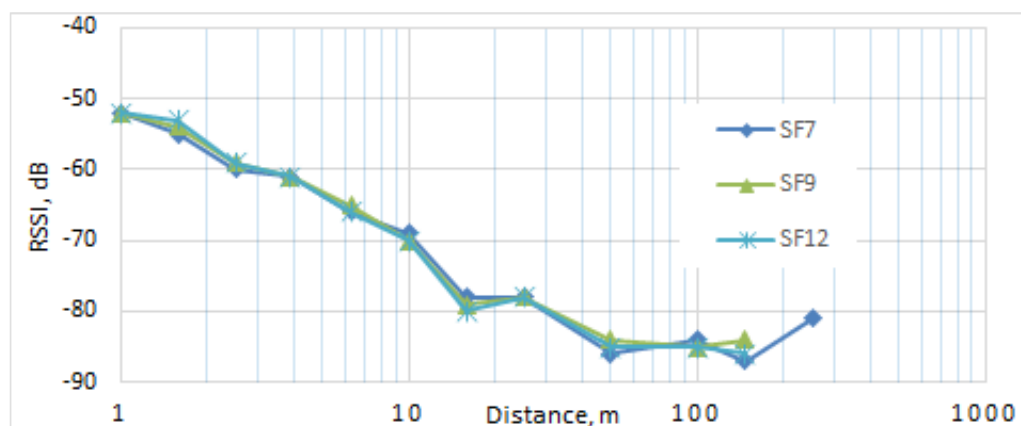


Рисунок 3.7 – Залежність значень RSSI від відстані на частоті 2,4 ГГц

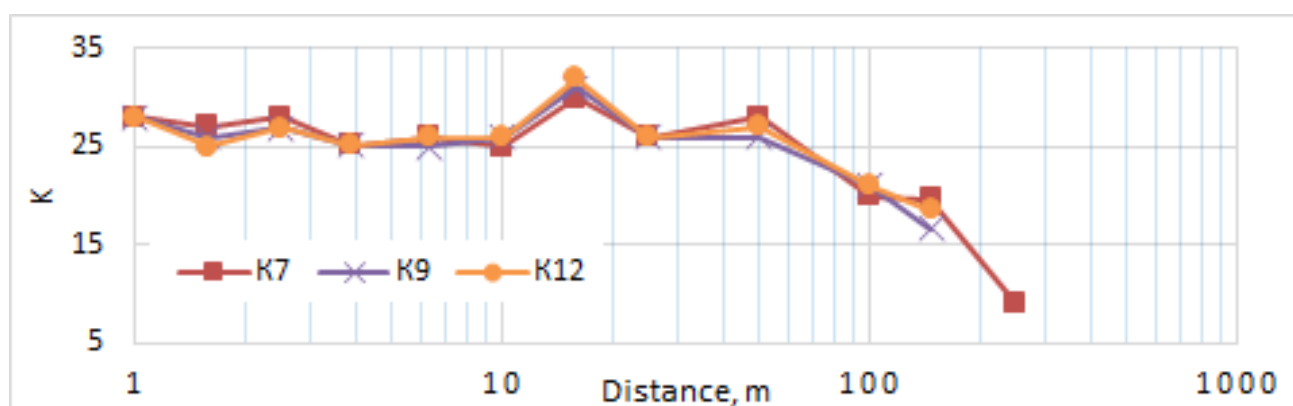


Рисунок 3.8 – Значення коефіцієнта K для 2,4 ГГц та різних значень SF

Зростання та падіння значень RSSI на частотах 433 МГц, 868 МГц і 2,4 ГГц можна пояснити певною нелінійністю в залежності значень RSSI від фактичної вхідної потужності. Така нелінійність була досліджена в [23] з використанням аналізатора спектру без бездротової передачі сигналу і залежить від схеми RSSI. Це вказує на те, що при використанні значень RSSI слід також враховувати особливості апаратної платформи.

Окремо варто звернути увагу на результати вимірювань в діапазоні 2,4 ГГц (рис. 3.7, 3.8), в якому технологія LoRa збирається конкурувати з мережами Wi-Fi за

організацію мереж WSN локального масштабу. Вимірювання показали, що з обраною антеною та заданою потужністю передавача дальність у діапазоні 2,4 ГГц обмежена приблизно на 250 м. Водночас у цій точці спостерігалися помилки прийому, через що отримане значення RSSI суттєво відрізняється від значень у сусідніх точках (рис. 3.7). Слід також зазначити, що досягнення зазначеного діапазону стало можливим лише у разі застосування коефіцієнта розкиду $SF=7$. Для решти значень $SF=9$ і $SF=12$ максимальна дальність в діапазоні 2,4 ГГц була не далі 160 м. Таким чином, підтверджується той факт, що мінімальні значення SF забезпечують максимальну дальність зв'язку технології LoRa та найвищу завадостійкість при однакових значеннях пропускної здатності каналу зв'язку та кодової швидкості.

На основі значень коефіцієнта K для різних відстаней (рис. 3.4, рис. 3.6 і рис. 3.8) розраховано середні значення K для кожного з використаних значень SF і різних частот сигналу. Отримані результати представлені в таблиці 3.2

Таблиця 3.2. Значення коефіцієнта K за різних значень SF .

Spreading Factor	433 MHz	868 MHz	2.4 GHz
$SF = 7$	49	47	24
$SF = 9$	54	50	25
$SF = 12$	54	50	26

З аналізу даних таблиці 3.2 та графіків що наведені на рисунках 3.9 – 3.13 випливає, що відхилення значень втрат на шляху (PL), отриманих за допомогою RSSI, визначаються особливостями апаратної платформи (використовуваний чіп, трансивер і антена), а також залежать від ступеня ідеальності умов експерименту, оскільки середовище вільного простору створити досить проблематично і виникне ефект багатопроменевого поширення.

Слід також зазначити, що приблизні значення коефіцієнта K на частотах 433 МГц і 868 МГц для $SF=7$ трохи менші, ніж для значень $SF=9$ і $SF=12$, що також пояснює більший діапазон технології LoRa. в цих діапазонах частот для $SF=7$. На частоті 2,4 ГГц коефіцієнт K майже не змінюється.

На рисунках 3.9 – 3.13 показано графіки PL від відстані для різних значень SF і різних частот. Графіки містять значення PL, розраховані за значеннями RSSI з формул (2) і (3), а також теоретичне значення FSPL з формули (1).

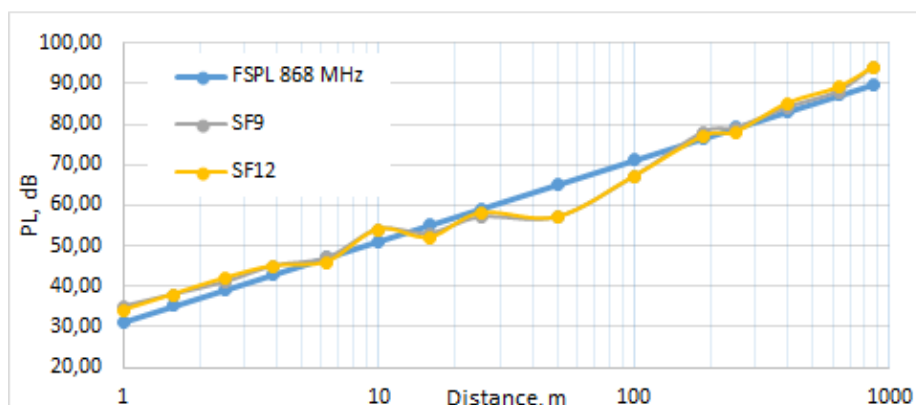


Рисунок 3.9 – Втрати на шляху PL в залежності від відстані на 868 МГц і К=50

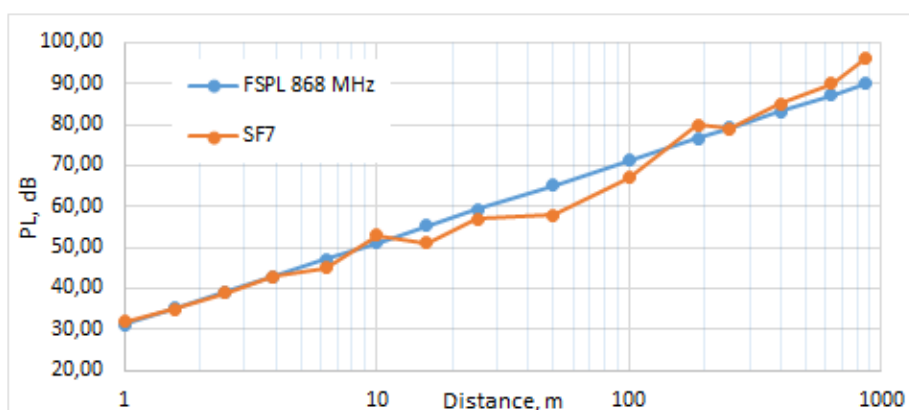


Рисунок 3.10 – Втрати на шляху PL від відстані на 868 МГц і К=47

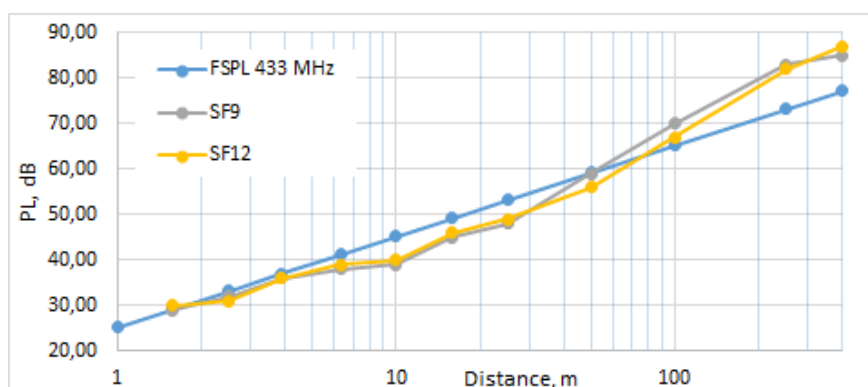


Рисунок 3.11 – Втрати на шляху PL від відстані на 433 МГц і К=54

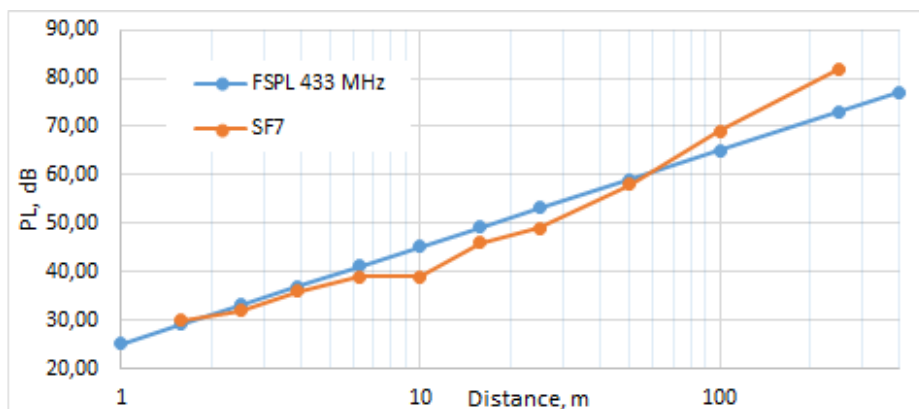


Рисунок 3.12 – Втрати на шляху PL в залежності від відстані на 433 МГц і K=49.

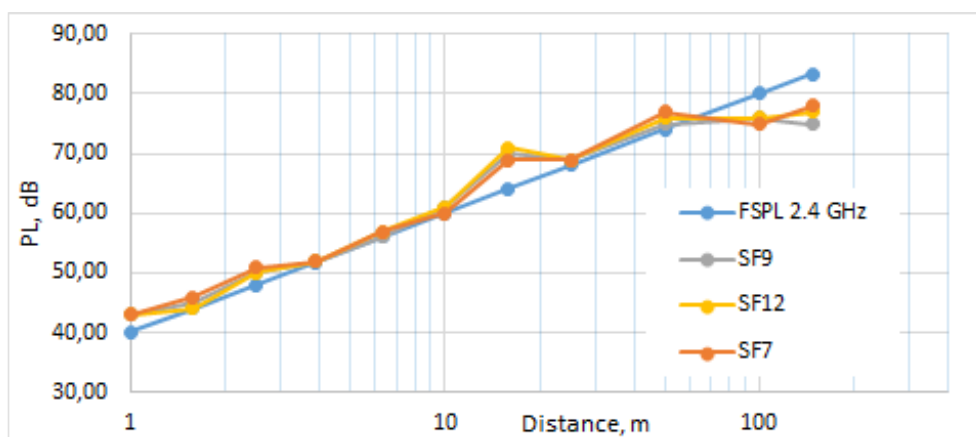


Рисунок 3.13 – Втрати на шляху PL в залежності від відстані на 2,4 ГГц і K=25

Значення PL на основі отриманих значень RSSI враховує коефіцієнт K з формули (4), який є середнім значенням для всіх відстаней і береться з таблиці 3.2. З графіків видно, що максимум відхилення значень PL від теоретичного не перевищує 10-12 дБ. При вказаних значеннях потужності передачі запас зв'язку LoRaWAN становить 154 дБ. Таким чином, результат достатньо хороший для оцінки [10].

Висновки до розділу

Розглянуто особливості трансиверів SX12 у прототипі на якому проводились експеримент. За результатами аналізу встановлено, що для кожного типу трансиверів існують різні підходи у вимірюванні RSS.

Необхідно враховувати нелінійність амплітудної характеристики приймача та неідеальне середовище вимірювання під час вимірювання вхідної потужності за допомогою даних RSSI. Запропонована методика визначення реальної вхідної потужності приймача LoRa на основі значень RSSI розглядає таку нелінійність комплексно, використовуючи зміщення між значеннями RSSI та вхідною потужністю приймача. Недоліком цього підходу є вплив перешкод.

В результаті вимірювань ослаблення сигналу та відповідних розрахунків отримано середні значення коефіцієнтів K для трьох типів мікросхем LoRa на частотах 433 МГц, 868 МГц та 2,4 ГГц для різних значень коефіцієнта розтікання. Використання цих коефіцієнтів дозволяє оцінити втрати на шляху з точністю, достатньою для оціночних розрахунків.

Проведені розрахунки та отримані графіки показують, що похибка оцінки втрат в залежності від відстані не перевищує 10-12 дБ. Щоб підвищити точність оцінки втрат на шляху, варто провести комп'ютерне моделювання цього експерименту, використовуючи отримані дані коефіцієнту обладнання. Щоб підвищити точність оцінки втрат на шляху, можна зменшити похибку, пов'язану з нелінійністю зв'язку між значеннями RSSI і фактичною потужністю на вході приймача, що вимагатиме уточнення цього співвідношення без впливу навколишнього середовища. У цьому випадку замість зсуву, який додається до значень RSSI, буде використовуватися масив коефіцієнтів.

4 МОДЕЛЮВАННЯ RRSI З ВИКОРИСТАННЯМ ПЗ

4.1 Програмне забезпечення для симуляції мережі LoRaWAN

Комп'ютерне моделювання та симуляція є правильним методом для збагачення дослідження ефективності системи та оцінки тактики її функціонування за допомогою творчих чи прогнозних підходів. Імітаційна модель — це конструкція, яка враховує обчислювальні алгоритми, фізичні та математичні терміни та інженерні формули, які узагальнюють поведінку та продуктивність прикладів нематеріального світу системи. Симуляція мережі LoRa є більш важливою, оскільки її можна використовувати без дорогого впровадження до фактичного виконання фреймворку для розробки та оцінки програми на основі LoRa. Для технології LoRa існують вузькоспеціалізовані та вільно доступні інструменти моделювання. Усі симулятори LoRa були розроблені та використані в літературі для вивчення різних сценаріїв LoRa [37].

LoRaSim був розроблений на основі SimPy як дискретний симулятор подій, що використовує Python для моделювання, дослідження та аналізу масштабованості мережі LoRaWAN і функціональності колізій [38]. LoRaSim включає багато сценаріїв Python, основою яких є `loraDir.py`, `loraDirMulBs.py`, `directionalLoraIntf.py`, `oneDirectionalLoraIntf.py`, `LoRaWAN.py` та `LoRaEnrgysim.py`. Перший сценарій призначений для моделювання окремого шлюзу, тоді як `loraDirMulBs.py` використовується для емуляції кількох шлюзів (до 24). `DirectionalLoraIntf` може емулювати пристрої, оснащені спрямованими антенами та багатьма мережами, тоді як `oneDirectionalLoraIntf.py` призначений для емуляції шлюзів із спрямованими антенами та багатьма мережами. Модель розповсюдження радіохвиль реалізована в LoRaSim залежно від загальновідомої моделі втрат на шляху на великій відстані. Оцінено чутливість радіоприймача при кімнатній температурі щодо різних налаштувань LoRa SF і BW. Він також враховує багато пов'язаних параметрів, таких як потужність теплового шуму, смуга пропускання приймача, коефіцієнт шуму та SNR. Для безперебійної роботи LoRaSim потрібні кілька пакетів, наприклад `matplotlib`, `SimPy` і `NumPy`.

Ns-3 — це симулятор мережі з дискретними подіями з відкритим вихідним кодом, який було запущено в середині 2006 року [64,65] і все ще знаходиться в стадії інтенсивної розробки, написаний на C++ і Python. Симулятор ns-3 підтримує широкий спектр протоколів, таких як Wi-Fi, LTE, IEEE 802.15.4, SigFox, LoRa та інші мережі. Він також реалізує IP-мережу, підтримуючи як симуляцію, так і емуляцію за допомогою сокетів, призначених для науковців і дослідників [66]. Ns-3 можна виконувати на чистому C++, а деякі компоненти моделювання можна писати на Python. Він є модульним і може працювати в графічному інтерфейсі та інтерфейсі командного рядка NetAnim для C++ і PyViz для Python. Він також створює доріжки Pcap, які можна використовувати для налагодження. Стандартне програмне забезпечення, таке як Wireshark [67], можна використовувати для читання файлів трасування для аналізу мережевого трафіку. Симулятор ns-3 пропонує практичне та добре структуроване налаштування з підтримкою анімації за допомогою NetAnim. Модуль LoRaWAN був розроблений і реалізований у ns-3, щоб забезпечити потужний інструмент для моделювання реальної мережі LoRaWAN замість моделювання спрощеного протоколу MAC. Цей додатковий модуль дозволяє дослідницькому співтовариству та розробникам досягти кращого розуміння поведінки фізичного та MAC-рівнів у мережах LoRa, зарахованих до LoRaSim, що дозволяє користувачам тестувати мережу з різними SF на основі зворотного зв'язку шлюзу. Модуль LoRaWAN ns-3 може бути використаний для моделювання мереж LoRaWAN. Крім моделей, створених для представлення різних компонентів мережі, і інтегрованих помічників, які використовуються для їх налаштування, модуль ns-3 LoRaWAN включає трекер пакетів, який можна використовувати для моніторингу поведінки мережі та аналізу її продуктивності. Він також містить засоби для зберігання топології мережі у файлі для налагодження та моніторингу. Він також надає багато сценаріїв як приклади простих і складних випадків використання мережі. Інтегрований модуль LoRaWAN відповідає вимогам пристроїв класу A. Це означає, що він може імітувати випадки використання, коли пристрої надсилають висхідні канали та отримують низхідні канали з сервера. У порівнянні з двома іншими доступними класами LoRa (клас B і клас C), найбільш енергоефективні кінцеві

пристрої цього класу. Щоб надати гнучке рішення з високою можливістю конфігурації, побудовано фізичний рівень, рівень MAC, транспортування та використання. Що стосується основних функцій модуля ns-3 на основі LoRaWAN, то це встановлення мережевого сервера, ADR, підтверджені повідомлення та підтримка мульти-GW [37].

PhySimulator використовувався як оцінка рівня зв'язку для LoRa, яка показує, що, хоча теоретично розглядається те, що коефіцієнти поширення можна вважати ортогональними, LoRa має реальну проблему зіткнення факторів поширення між ними [5]. Метою PhySimulator є забезпечення рівня зв'язку LoRa. MATLAB пише PhySimulator. Метою симулятора є перевірка прийому двох передач LoRa, що заважають різним змінним дифракції [86]. Зокрема, на вихід кожного коефіцієнта поширення впливає частота помилок пакета, символу та бітів, які заважають іншим факторам поширення. Користувач може використовувати цей симулятор для редагування кількох параметрів (тобто змінювати значення кодів змінних). Наприклад, серед інших змінних можна змінювати пропускну здатність, корисне навантаження та максимальні тести за фазу, але неможливо змінити всі ці фактори через графічний інтерфейс. Користувач повинен редагувати їх безпосередньо, змінюючи код MATLAB.

Фреймворк для симулятора LoRa (FLoRa) розроблений для оцінки продуктивності мережі LoRaWAN завдяки механізму ADR. Доведено ефективність ADR при збільшенні PDR з підвищенням енергоефективності. FLoRa — це система наскрізного моделювання для мереж LoRa, яка спирається на симулятор мережі OMNeT++, а також використовує компоненти системи INET. Бібліотека OMNeT++ з відкритим вихідним кодом була розроблена для підтримки процесу експериментування для різних мережевих протоколів. Код FLoRa створюється на C++ і дозволяє розробляти мережі LoRa, які підтримують інтеграцію вузлів, шлюзів і модулів мережевого сервера LoRa. Логіка програми може бути реалізована у вигляді окремих модулів, які пов'язані з мережевим сервером. Мережевий сервер і вузли підтримують динамічні параметри конфігурації, керовані через ADR, а також розглядають колізії та ефект захоплення. Модуль включає точне моделювання

транзитної мережі та може імітувати кілька шлюзів. Наприкінці моделювання статистику споживання енергії можна зібрати в кожному вузлі та по всій мережі.

Крім того, модулі протоколу LoRaWAN MAC прагнуть імітувати фізичний рівень. Це пропонує дуже потужний графічний інтерфейс порівняно з іншими додатками для моделювання, оскільки він базується на OMNeT++ і графічному описі мережі. Розроблений модуль моделювання включає зразок сценарію в каталозі моделювання FLoRa. Сценарій має кілька функцій для імітації мережі з 10 вузлами, які випадковим чином розміщені в квадратній топології мережі, з одним шлюзом, який підключено до мережевого сервера. Кожен вузол передає пакет за один раз на основі експоненціального розподілу з визначеним середнім. Для моделювання мережі LoRa необхідно вибрати кілька параметрів, таких як час моделювання, період розігріву, SF, потужність передачі для кожного кінцевого вузла LoRa, конфігурація мережі зворотного зв'язку та канали зв'язку. Статистика моделювання та файли трасування генеруються після завершення циклу [37].

4.2 Програмний пакет OMNeT++

OMNeT++ – це об'єктно-орієнтована модульна система моделювання мережі дискретних подій. Він має загальну архітектуру, тому його можна (і використовував) у різних проблемних областях:

- моделювання дротових і бездротових мереж зв'язку;
- моделювання протоколу;
- моделювання мереж масового обслуговування;
- моделювання мультипроцесорних та інших розподілених апаратних систем;
- перевірка апаратних архітектур;
- оцінка аспектів продуктивності складних програмних систем;
- загалом, моделювання та симуляція будь-якої системи, де підходить підхід дискретних подій і може бути зручно відображено в об'єктах, які спілкуються шляхом обміну повідомленнями.

OMNeT++ сам по собі не є симулятором чогось конкретного, а надає інфраструктуру та інструменти для написання симуляцій. Одним із фундаментальних

компонентів цієї інфраструктури є архітектура компонентів для імітаційних моделей. Моделі збираються з багаторазових компонентів, які називаються модулями. Добре написані модулі справді багаторазові, і їх можна комбінувати різними способами.

Модулі можна з'єднувати один з одним за допомогою шлюзів (інші системи називали б їх портами) і об'єднувати в складені модулі. Глибина вкладеності модулів не обмежена. Модулі спілкуються через передачу повідомлень, де повідомлення можуть містити довільні структури даних. Модулі можуть передавати повідомлення за заздальгідь визначеними шляхами через шлюзи та з'єднання або безпосередньо до місця призначення; останнє корисно, наприклад, для бездротового моделювання. Модулі можуть мати параметри, які можна використовувати для налаштування поведінки модуля та/або для параметризації топології моделі. Модулі на найнижчому рівні ієрархії модулів називаються простими модулями, і вони інкапсулюють поведінку моделі. Прості модулі програмуються на C++ і використовують бібліотеку моделювання.

Симуляції OMNeT++ можна запускати в різних інтерфейсах користувача. Графічні інтерфейси користувача з анімацією дуже корисні для демонстрації та налагодження, а інтерфейси командного рядка найкраще підходять для пакетного виконання.

OMNeT++ також підтримує паралельне розподілене моделювання. OMNeT++ може використовувати декілька механізмів для зв'язку між розділами паралельної розподіленої симуляції, наприклад, MPI або іменовані канали. Алгоритм паралельного моделювання можна легко розширити або підключити нові. Моделі не потребують жодних спеціальних приладів для паралельного запуску – це лише питання конфігурації. OMNeT++ можна використовувати для презентації алгоритмів паралельного моделювання в класі, оскільки є можливість запускати моделювання паралельно навіть у графічному інтерфейсі користувача, який забезпечує детальний відгук про те, що відбувається [24].

4.3 Приклад моделювання *tictoc* мережі

Для початку розглянуто «мережу», яка складається з двох вузлів. Вузли роблять прості дії, а саме: один із вузлів створить пакет, а два вузли продовжуватимуть передавати той самий пакет вперед і назад. Викликаємо вузли *tic* та *toc*. Запускаємо OMNeT++ IDE, вводимо для цього `omnetpp` у термінал. Увійшовши в IDE, й вибираємо у меню «Новий» → Проект OMNeT++ (рис 4.1).

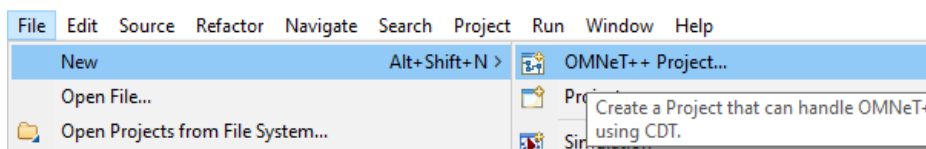


Рисунок 4.1 – Створення нового проекту в OMNeT++

OMNeT++ використовує файли NED для визначення компонентів і збирання їх у більші одиниці, такі як мережі. Починаємо реалізацію вказаної моделі з додавання файлу NED. Щоб додати файл до проекту, необхідно клацнути правою кнопкою миші каталог проекту на панелі Project Explorer ліворуч і вибрати у меню «Новий» → «Файл опису мережі» (NED). Вводимо `tictoc1.ned` у поле назви файлу.

Редактор NED OMNeT++ IDE має два режими, Design і Source; між ними можна перемикатися завдяки вкладкам у нижній частині редактора. У режимі проектування топологію можна редагувати графічно, використовуючи мишу та палітру праворуч. У Source вихідний код NED можна безпосередньо редагувати як текст. Зміни, зроблені в одному режимі, будуть миттєво відображені в іншому. (Оскільки файли NED є звичайними текстовими файлами, можна використовувати зовнішній текстовий редактор для їх редагування, хоча без підсвічування синтаксису, допомоги у вмісті, перехресні посилання та інші функції IDE.)

Переходимо у режим Source та вводимо наступне:

```
simple Txc1
{
    gates:
        input in;
        output out;
}
//
// Two instances (tic and toc) of Txc1 connected both ways.
```

```
// Tic and toc will pass messages to one another.
//
network Tictoc1
{
    submodules:
        tic: Txc1;
        toc: Txc1;

    connections:
        tic.out --> { delay = 100ms; } --> toc.in;
        tic.in <-- { delay = 100ms; } <-- toc.out;
}
```

Повертаємось в режим Design й бачимо результат показаний на рисунку 4.2.

Перший блок у файлі оголошує Txc1 як простий тип модуля. Прості модулі є атомарними на рівні NED. Вони також є активними компонентами, і їх поведінка реалізована в C++. У декларації також зазначено, що Txc1 має вхідні ворота з назвою in та вихідні ворота з назвою out.

Другий блок оголошується Tictoc1 як мережа. Tictoc1 складається з двох підмодулів tic і toc, обидва екземпляри типу модуля Txc1. Вихідний шлюз tic з'єднаний з toc вхідним шлюзом і навпаки. Буде 100 мс затримки поширення в обох напрямках.

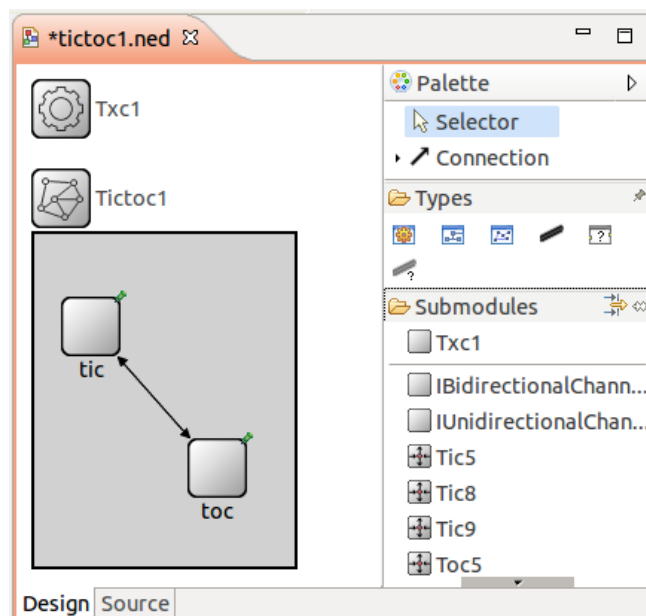


Рисунок 4.2 – Результат скрипту tictoc1.ned

Потрібно реалізувати функціональність простого модуля Txc1 на C++. Створюємо файл із назвою txc1.cc, («Створити» → «Вихідний файл» у контекстному

меню проекту або «Файл» → «Новий» → «Файл» у головному меню IDE), і вводимо такий вміст:

```
#include <string.h>
#include <omnetpp.h>

using namespace omnetpp;

/**
 * Derive the Txc1 class from cSimpleModule. In the Tictoc1 network,
 * both the `tic' and `toc' modules are Txc1 objects, created by OMNeT++
 * at the beginning of the simulation.
 */
class Txc1 : public cSimpleModule
{
protected:
    // The following redefined virtual function holds the algorithm.
    virtual void initialize() override;
    virtual void handleMessage(cMessage *msg) override;
};

// The module class needs to be registered with OMNeT++
Define_Module(Txc1);

void Txc1::initialize()
{
    // Initialize is called at the beginning of the simulation.
    // To bootstrap the tic-toc-tic-toc process, one of the modules needs
    // to send the first message. Let this be `tic'.

    // Am I Tic or Toc?
    if (strcmp("tic", getName()) == 0) {
        // create and send first message on gate "out". "tictocMsg" is an
        // arbitrary string which will be the name of the message object.
        cMessage *msg = new cMessage("tictocMsg");
        send(msg, "out");
    }
}

void Txc1::handleMessage(cMessage *msg)
{
    // The handleMessage() method is called whenever a message arrives
    // at the module. Here, we just send it to the other module, through
    // gate `out'. Because both `tic' and `toc' does the same, the message
    // will bounce between the two.
    send(msg, "out"); // send out the message
}
```

Простий Txc1 тип модуля представлено C++ класом Txc1. Клас Txc1 має стати підкласом класу OMNeT++ cSimpleModule і має бути зареєстрований у OMNeT++ за допомогою Define_Module() макросу.

Перезначаємо два методи з cSimpleModule: initialize() і handleMessage(). Вони викликаються з ядра симуляції: перший лише один раз, а другий щоразу, коли повідомлення надходить до модуля.

У `initialize()` створюємо об'єкт повідомлення (`cMessage`) і надсилаємо його на ворота `out`. Оскільки цей шлюз підключений до вхідного шлюзу іншого модуля, ядро симуляції доставить це повідомлення іншому модулю в аргументі – `handleMessage()` після затримки поширення 100 мс, призначеної для посилення у файлі `NED`. Інший модуль просто надсилає його назад (ще одна затримка 100 мс), тому це призведе до безперервного пінг-понгу.

Повідомлення (пакети, кадри, завдання тощо) і події (таймери, тайм-аути) представлені об'єктами `cMessage` (або їх підкласами) в `OMNeT++`. Після того, як надішлете або заплануєте, ядро симуляції зберігатиме їх у списку «запланованих подій» або «майбутніх подій», доки не настане їх час і вони не будуть доставлені до модулів через `handleMessage()`.

Зауважимо, що в цій симуляції немає умови зупинки: вона триватиме вічно, але є можливість зупинити це з графічного інтерфейсу користувача. (Також можемо вказати ліміт часу симуляції або ліміт часу ЦП у файлі конфігурації) [25].

Щоб мати можливість запустити симуляцію, потрібно створити `omnetpp.ini` файл. Цей файл повідомляє програмі моделювання, яку мережу ви бажаєте змодельовати (оскільки файли `NED` можуть містити декілька мереж), ви можете передавати параметри в модель, явно вказувати початкові числа для генераторів випадкових чисел тощо.

Створюємо `omnetpp.ini` файл через пункт у меню (Файл → Створити → Файл ініціалізації (INI)). Новий файл відкриється в редакторі початкових файлів. Як і редактор `NED`, редактор початкових файлів також має два режими, `Form` і `Source`, які редагують той самий вміст. Перший більше підходить для налаштування ядра симуляції, а другий для введення параметрів модуля.

Перейдіть у режим `Source` та вводимо наступне:

```
[General]
```

```
network = Tictoc1
```

`tictoc2` і всі подальші кроки використовуватимуть спільний файл `omnetpp.ini`.

Цим завершуємо створення моделі, та готові скомпілювати та запустити її.

Тепер можемо запустити симуляцію, обираємо %omnetpp.ini (в області редактора або в провіднику проекту) й натискаємо «Виконати».

4.4 Короткий опис симуляційної моделі FLoRa

FLoRa (Framework for LoRa) — це програмна основа для виконання наскрізного моделювання мереж Long Range (LoRa).

- Точна модель фізичного рівня LoRa (включаючи зіткнення та ефект захоплення)
- Симуляції з одним (або кількома) шлюзами в мережі
- Наскрізне моделювання, включаючи точне моделювання транспортної мережі
- Статистика енергоспоживання в мережі

FLoRa базується на симуляторі OMNeT++ і середовищі INET й надає змогу створювати мережі LoRa з модулями для вузлів LoRa, шлюзу і мережевого сервера. Логіка програми може бути розгорнута як незалежні модулі, які підключені до мережевого сервера. Мережевий сервер і вузли підтримують динамічне керування параметрами конфігурації за допомогою адаптивної швидкості передачі даних (ADR). Статистика споживання енергії збирається в кожному із вузлів [26]. Аби запустити просте моделювання на лівій бічній панелі завдяки Project Explorer обираємо omnetpp.ini, у цьому файлі можемо налаштувати багато різних параметрів симуляції, а потім натискаємо кнопку «Виконати» (рис. 4.3). Якщо це перший запуск, то буде запропоновано створити нову конфігурацію:

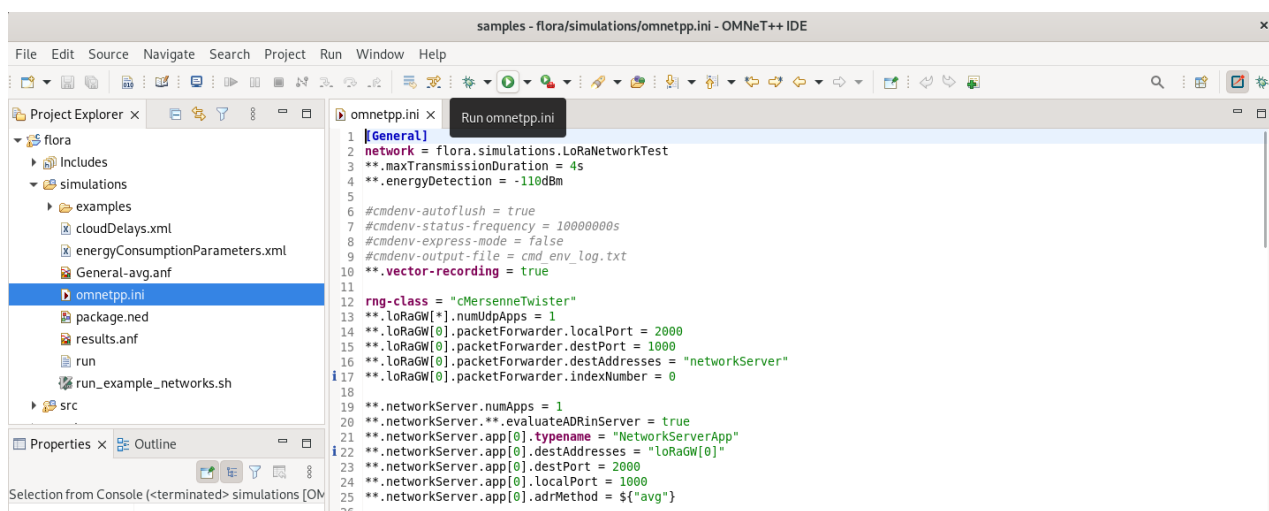


Рисунок 4.3 – Запуск простого моделювання у ПЗ OMNeT++

Через деякий час бачимо, що симуляція почалася. Конфігурація за замовчуванням підходить, тому можемо просто натиснути кнопку ОК (рис.4.4):

На цьому етапі видно всю систему моделювання. Налаштування його за допомогою кнопки «Запустити» на верхній панелі.

Щоб запустити симуляцію без перегляду деталей на екрані, просто запустіть експрес-режим (піктограма з трьома зеленими трикутниками) (рис.4.5).

Через деякий час моделювання має закінчитися. Натисніть ОК і закриваємо вікно симуляції, коли це буде зроблено:

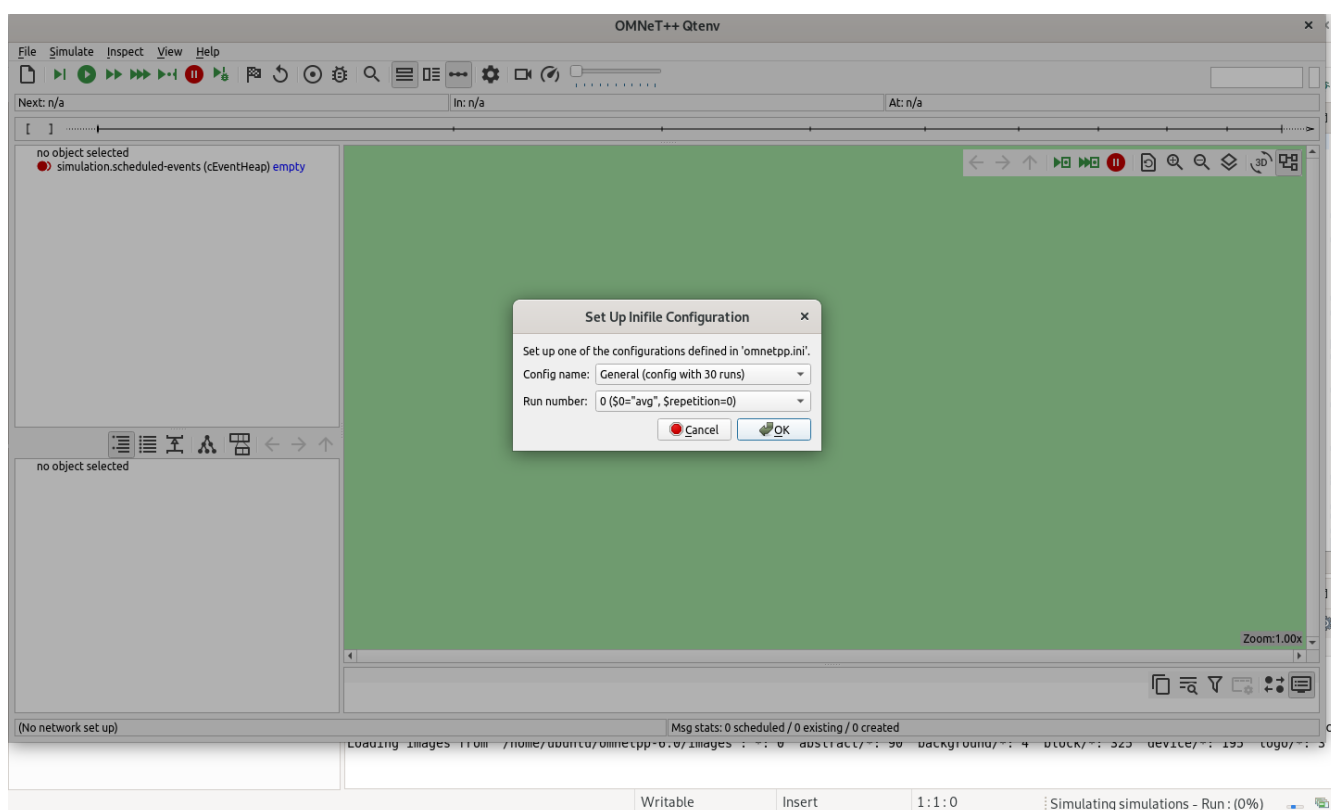


Рисунок 4.4 – Вікно симуляції OMNeT++ з початковим вікном додаткових налаштувань

Використовуємо інструмент, який входять до складу OMNeT++, для обробки даних, згенерованих під час моделювання. Щоб запустити його для попередньо запущеної симуляції, вибираємо файл General-avg.inf, який знаходиться в Project Explorer. Потім вибираємо різні дані, які були зібрані під час моделювання, і перевіряємо їх у графічній формі, вибравши відповідні вхідні дані (є можливість використовувати дані за замовчуванням).

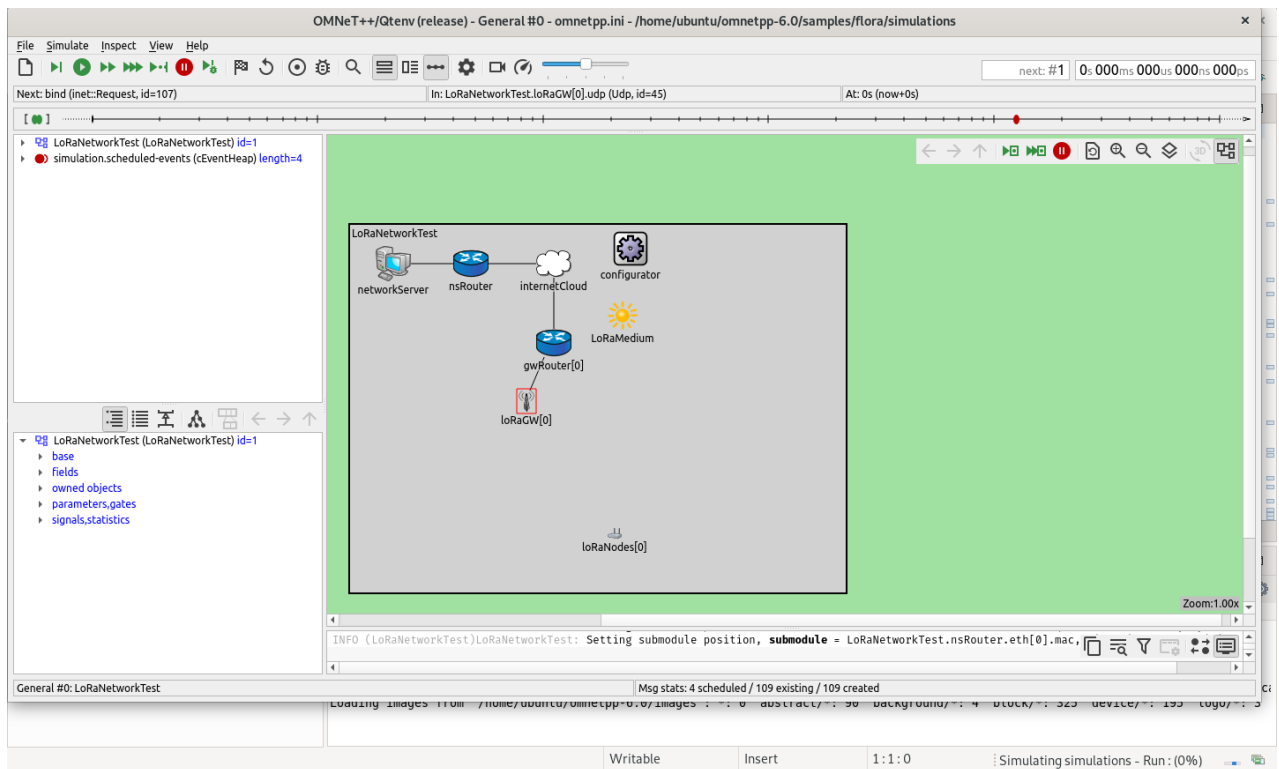


Рисунок 4.5 – Запуск симуляції

Гістограма значень RSSI у пакетах, зібраних мережевим сервером. Це представлення даних, зібраних мережевим сервером, які можна використовувати для оцінки механізму адаптивної швидкості передачі даних (ADR) зображена на рисунку 4.6.

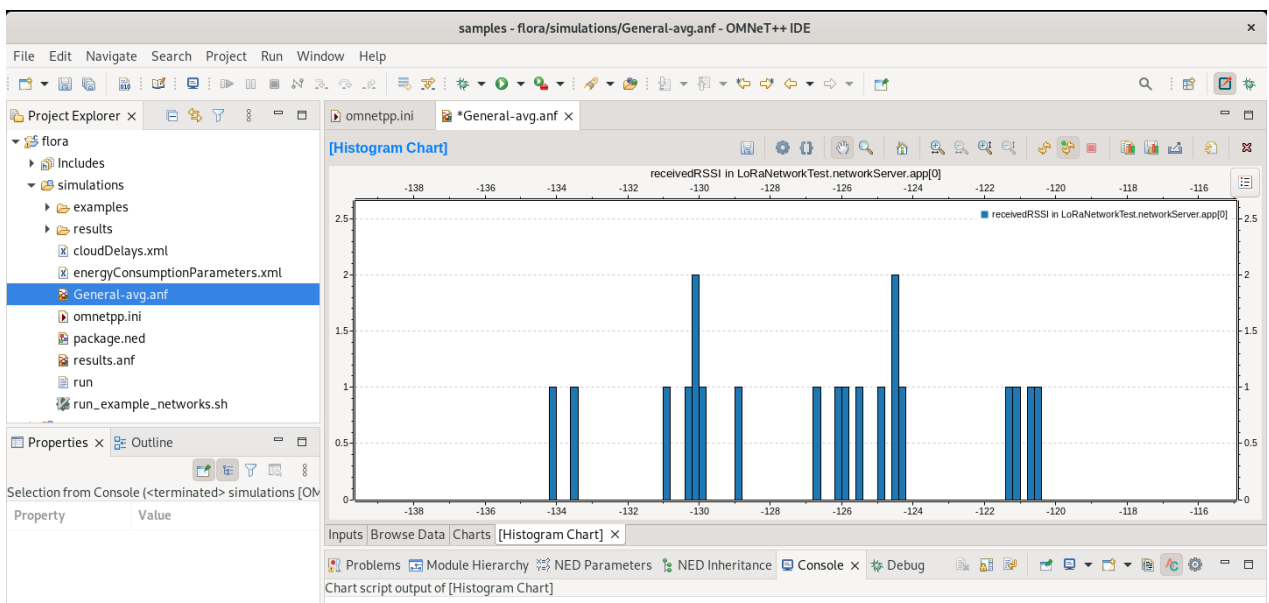


Рисунок 4.7 – Гістограма значень RSSI у пакетах, зібраних мережевим сервером

Коефіцієнт розповсюдження та потужність передачі кінцевого пристрою LoRa зображений на рисунку 4.8

Тут можна побачити, що механізм ADR налаштував як коефіцієнт розповсюдження, так і потужність передачі.

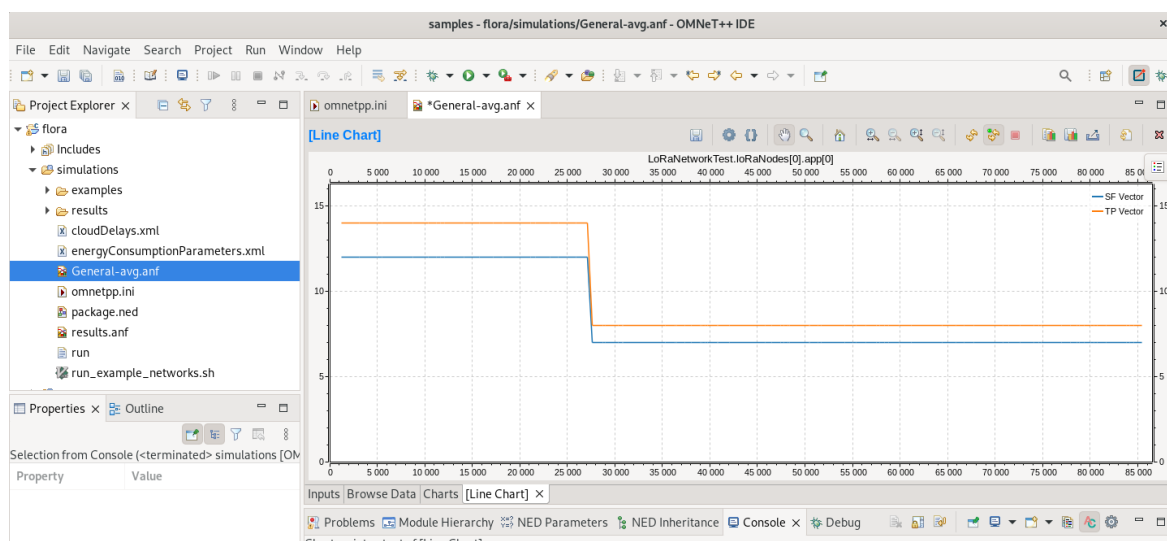


Рисунок 4.8 – Коефіцієнт розповсюдження та потужність передачі кінцевого пристрою LoRa

Гістограма, що показує енергію, яка витрачається за допомогою радіо зображена на рисунку 4.9.

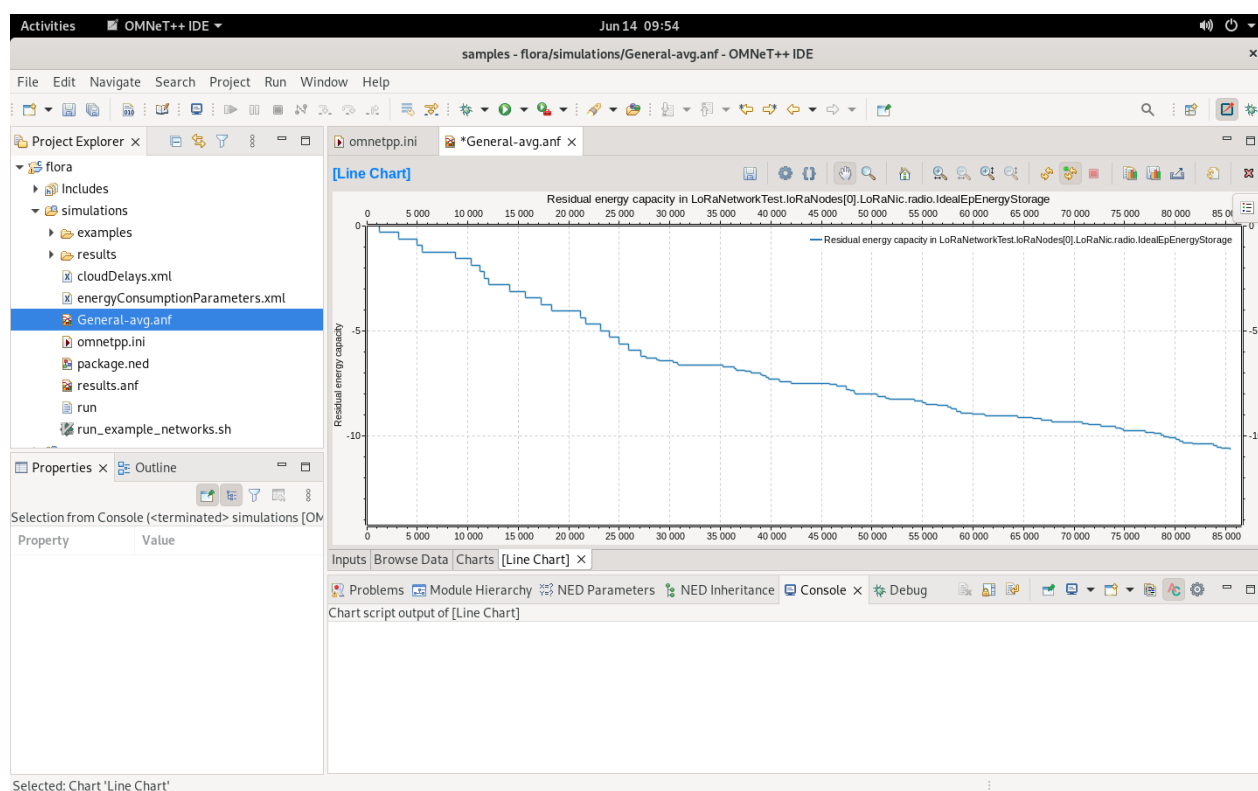


Рисунок 4.9 – Гістограма енергії, яка витрачається через радіо випромінювання

Це лише простий приклад того, які системи можливо змодельовати за допомогою FLoRa [27].

4.5 Модифікація коду симуляції

У даному моделюванні мережі використовуємо пакет FLoRa з деякими змінами у лістингу моделі поширення сигналів задля більш наближених результатів до реального експерименту. У самому проєкті заміняємо значення середнього шлях втрати на еталонній відстані оскільки він відрізняється від характеристик досліду описаний в [28], а також додаємо коефіцієнт обладнання, який визначено у дослідженні [10], й лістинг формули симуляції поширення сигналу приймає такий вигляд:

```
double LoRaLogNormalShadowing::computePathLoss(mps propagationSpeed,
Hz frequency, m distance) const
{
    // K(SF7)= 47, K(SF9, SF12) = 50
    double PL_d0_db = 51.21 + 50; // FSPL(10m) + K (parameters taken
from paper "Using RSSI Data for LoRa Network Path LossModeling")
    double PL_db = PL_d0_db + 10 * gamma * log10(unit(distance /
d0).get()) + normal(0.0, sigma);
    return math::dB2fraction(-PL_db);
}
```

Варто зазначити також у .ini файлі замінено параметри експоненти втрат на шляху, дисперсію та еталонну відстань:

```
**sigma = 2.65
**gamma = 2.2
**d0 = 10m
```

Також задаємо координати ноди та параметри передавача:

```
**loRaNodes[0]**initialX = 100.00m
**loRaNodes[0]**initialY = 100.00m + 1m # 1, 1.58, 2.51, 3.89,
6.30, 10, 15.84, 25.11, 50, 100, 188, 251, 398, 631, 864

**loRaNodes[0]**initialLoRaSF = 7 # 7, 9, 12
**loRaNodes[0]**initialLoRaTP = 21dBm # 17+2+2
```

4.6 Результати симуляції

На рисунках 4.10 – 4.12 показані графіки порівняння значень RSSI, отриманих в наслідок симуляції в програмному забезпеченні OMNeT++ від відстані для різних SF на частоті 868 МГц, та значень отриманих у вимірюваннях, які описані у розділі 3. Отримані дані занесені до табл. 4.1, 4.2.

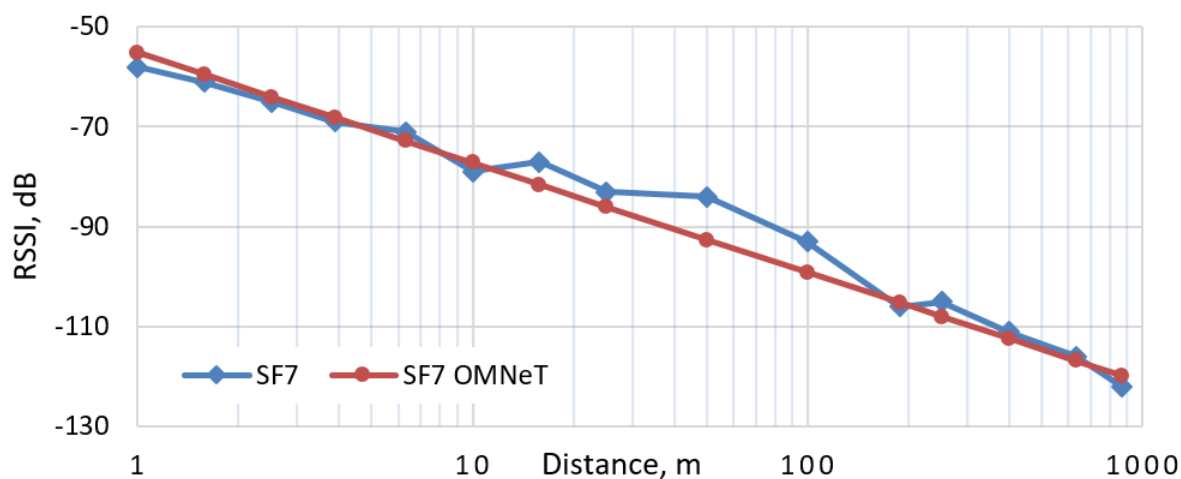


Рисунок 4.10 – Порівняння залежності значень RSSI отриманих експериментально та у симуляції OMNeT++ від відстані на частоті 868 МГц без урахування σ для SF7

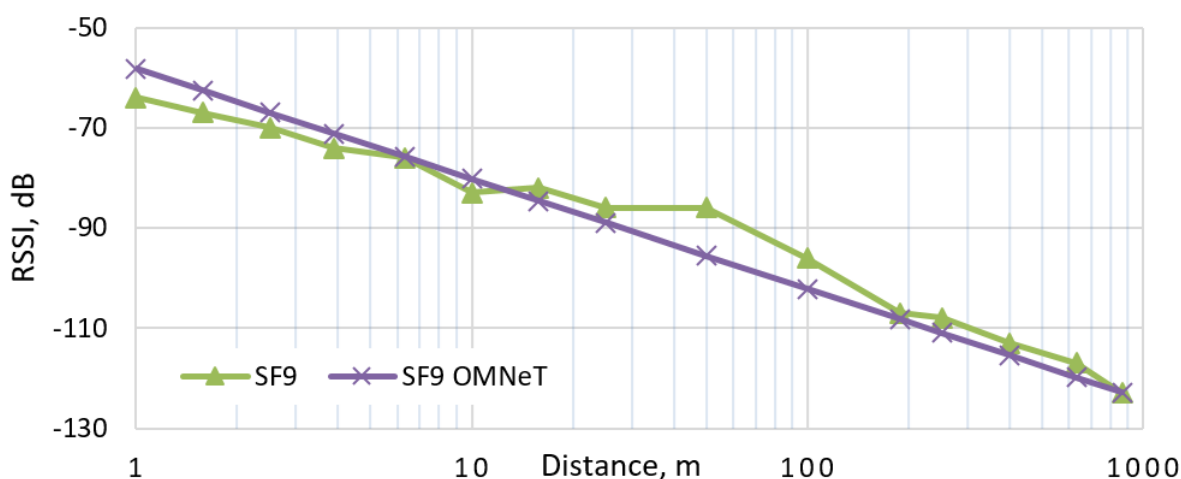


Рисунок 4.11 – Порівняння залежності значень RSSI отриманих експериментально та у симуляції OMNeT++ від відстані на частоті 868 МГц без урахування σ для SF9

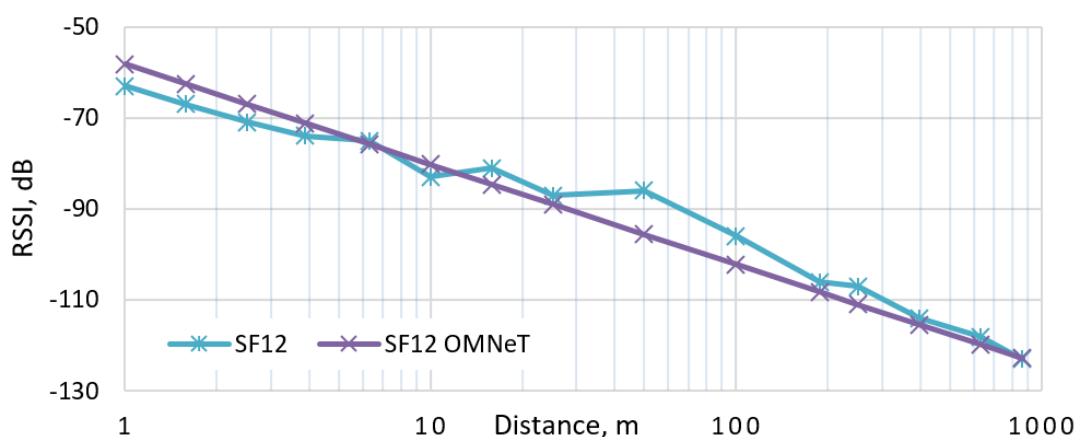


Рисунок 4.12 – Порівняння залежності значень RSSI отриманих експериментально та у симуляції OMNeT++ від відстані на частоті 868 МГц без урахування σ для SF12

З рисунків 4.10 – 4.12 випливає

На рисунках 4.13 – 4.15 зображено RSSI отриманих експериментально у межах мінімальних й максимальних значень отриманих у комп'ютерній симуляції OMNeT++ для різних значень SF залежно від відстані на частоті 868 МГц. З даних рисунків бачимо, що є підйом значень RSSI на відстані у 50 метрів, котре виходить за рамки коридору максимумів й мінімумів, які обраховані у симуляції мережі.

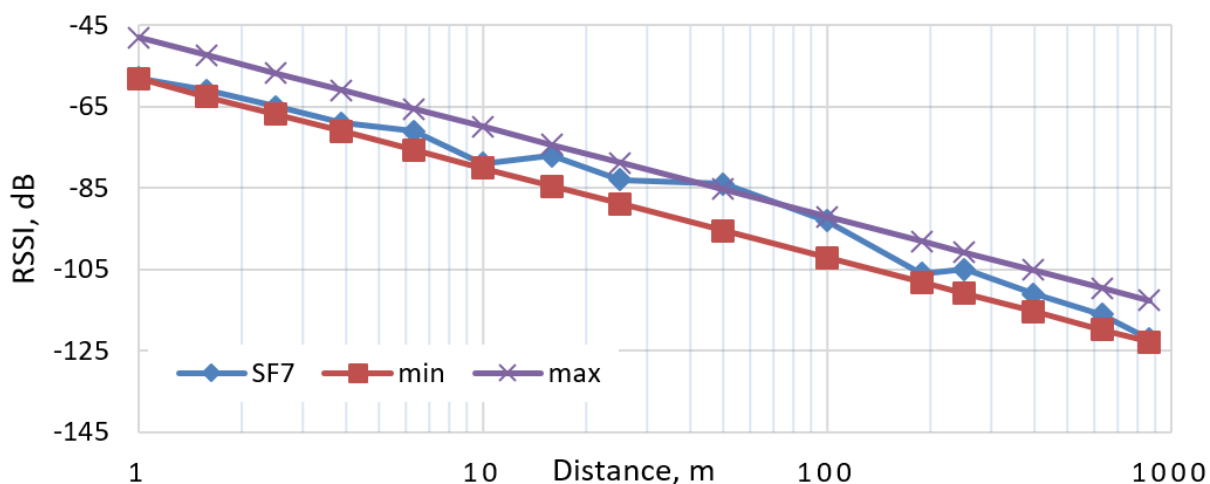


Рисунок 4.13 – Залежність значень RSSI від відстані на частоті 868 МГц з урахуванням $\sigma = 2.65$ для SF7 у межах відхилень min й max RSSI

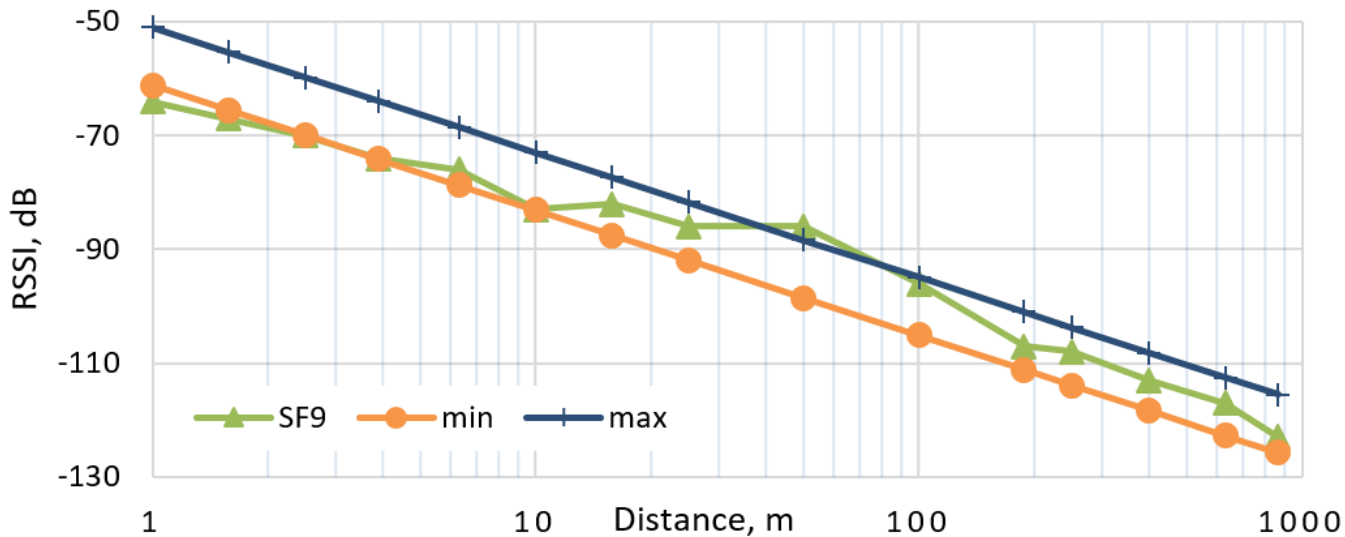


Рисунок 4.14 – Залежність значень RSSI від відстані на частоті 868 МГц з урахуванням $\sigma = 2.65$ для SF9 у межах відхилень min й max RSSI

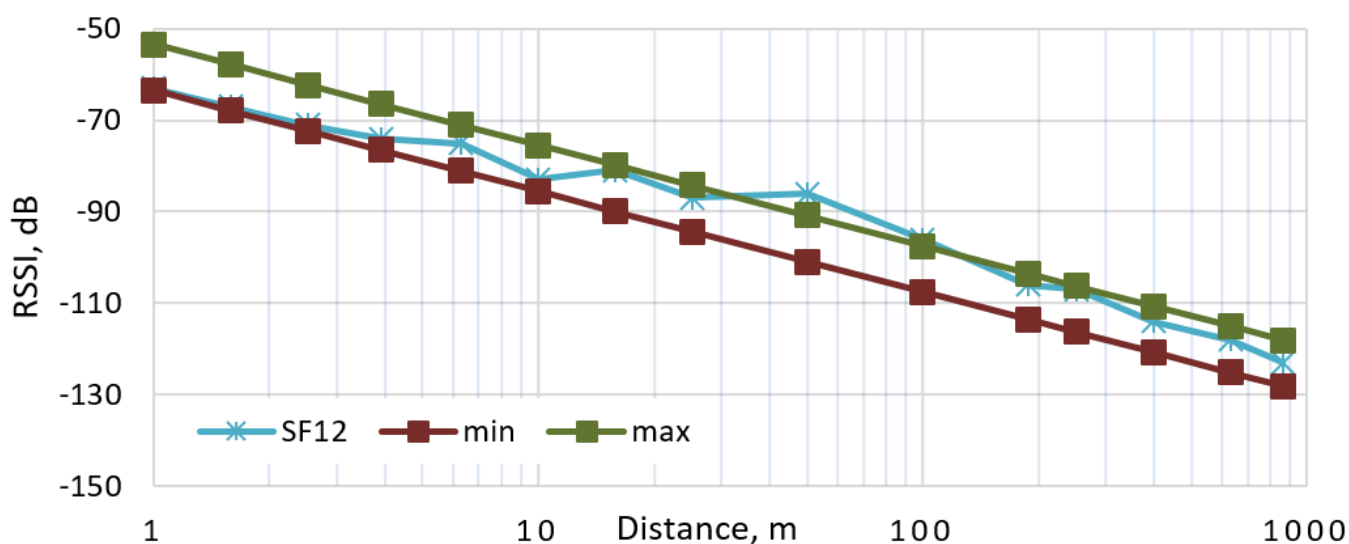


Рисунок 4.15 – Залежність значень RSSI від відстані на частоті 868 МГц з урахуванням $\sigma = 2.65$ для SF12 у межах відхилень min й max RSSI

На рисунках 4.16 – 4.17 показано графіки різниці отриманих значень в експерименті $RSSI_e$ та симуляції у програмному середовищі $RSSI_c$ від відстані для різних значень SF:

$$\Delta = RSSI_e - RSSI_c$$

Видно, що на відстані у 50 м різниця між значеннями RSSI досягає 10 дБ у разі використання SF12, у випадку SF9 різниця складає 9 дБ, а у випадку з SF7 – 8 дБ, що підтверджує вищу якість на меншому значенні SF. Дане відхилення зумовлено відбиттям під час експериментального вимірювання на макеті, вплив був створений відбиттям від будівлі, що розміщувалась поруч з макетом.

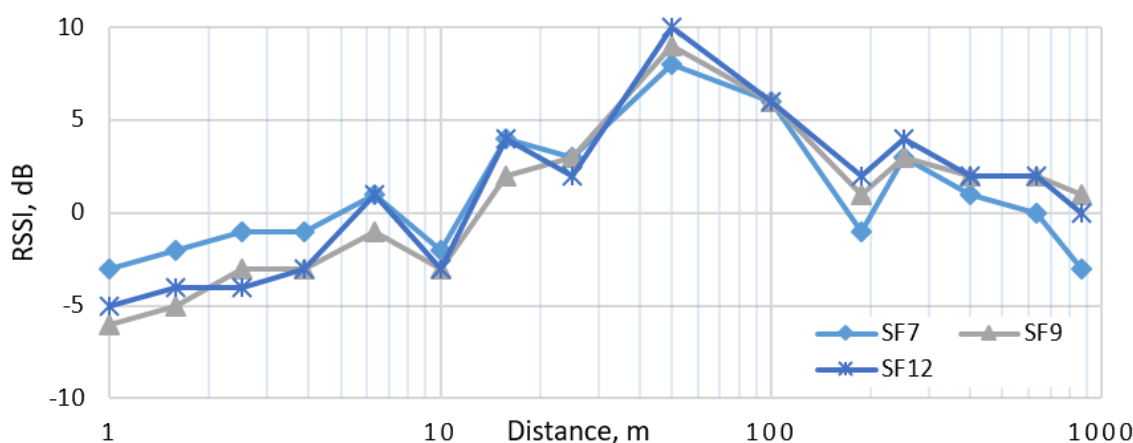


Рисунок 4.16 – Різниця значень RSSI експерименту та комп'ютерної моделювання

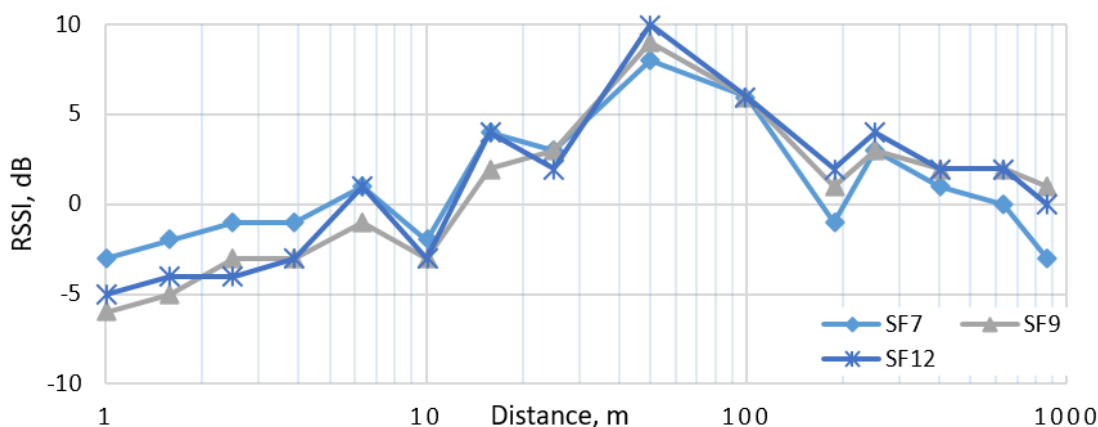


Рисунок 4.17 – Різниця значень RSSI експерименту та комп'ютерної моделювання

У таблиці наведено: значення дистанції d між БС та кінцевим вузлом, значення FSPL розраховані за формулою (2), У колонках указаний коефіцієнт поширення (SF) на яких відбувалась передача сигналу. Колонки мають поділ на значення отримані у ПЗ OMNeT++ та ті що отримані в експерименті, який описаний у розділі 3. Також наведена різниця між експериментальним та результатом симуляції Δ .

Таблиця 4.1 – Результати моделювання мережі з $\sigma = 0$

d, м	RSSI, дБ									FSPL, дБ
	SF7 OMNeT	SF7	Δ	SF9 OMNeT	SF9	Δ	SF12 OMNeT	SF12	Δ	
1	-55,2	-58	-3	-58,2	-64	-6	-58,2	-63	-5	31,21
1,58	-59,5	-61	-2	-62,6	-67	-4	-62,6	-67	-4	35,19
2,51	-64,0	-65	-1	-67,0	-70	-3	-67,0	-71	-4	39,21
3,89	-68,2	-69	-1	-71,2	-74	-3	-71,2	-74	-3	43,01
6,30	-72,8	-71	2	-75,8	-76	0	-75,8	-75	1	47,20
10	-77,2	-79	-2	-80,2	-83	-3	-80,2	-83	-3	51,21
15,84	-81,6	-77	5	-84,6	-82	3	-84,6	-81	4	55,21
25,11	-86,0	-83	3	-89,0	-86	3	-89,0	-87	2	59,21
50	-92,6	-84	9	-95,6	-86	10	-95,6	-86	10	65,19
100	-99,2	-93	6	-102,2	-96	6	-102,2	-96	6	71,21
188	-105,2	-106	-1	-108,2	-107	1	-108,2	-106	2	76,70

Продовження табл. 4.1

251	-108,0	-105	3	-111,0	-108	3	-111,0	-107	4	79,21
398	-112,4	-111	1	-115,4	-113	2	-115,4	-114	1	83,21
631	-116,8	-116	1	-119,8	-117	3	-119,8	-118	2	87,21
864	-119,8	-122	-2	-122,8	-123	0	-122,8	-123	0	89,94

Таблиця 4.2 – Результати моделювання мережі зі $\sigma = 2.65$

d, м	RSSI, дБ									FSPL, дБ
	SF7 OMNeT	SF7	Δ	SF9 OMNeT	SF9	Δ	SF12 OMNeT	SF12	Δ	
1	-54,9	-58	-3	-57,9	-64	-6	-58,4	-63	-5	31,21
1,58	-59,2	-61	-2	-62,2	-67	-5	-62,8	-67	-4	35,19
2,51	-63,6	-65	-1	-66,6	-70	-3	-67,2	-71	-4	39,21
3,89	-67,8	-69	-1	-70,8	-74	-3	-71,4	-74	-3	43,01
6,30	-72,4	-71	1	-75,4	-76	-1	-76,0	-75	1	47,20
10	-76,9	-79	-2	-79,9	-83	-3	-80,4	-83	-3	51,21
15,84	-81,2	-77	4	-84,2	-82	2	-84,8	-81	4	55,21
25,11	-85,7	-83	3	-88,7	-86	3	-89,2	-87	2	59,21
50	-92,2	-84	8	-95,2	-86	9	-95,8	-86	10	65,19
100	-98,9	-93	6	-101,9	-96	6	-102,4	-96	6	71,21
188	-104,9	-106	-1	-107,9	-107	1	-108,4	-106	2	76,70
251	-107,6	-105	3	-110,6	-108	3	-111,2	-107	4	79,21
398	-112,1	-111	1	-115,1	-113	2	-115,6	-114	2	83,21
631	-116,5	-116	0	-119,5	-117	2	-120,0	-118	2	87,21
864	-119,5	-122	-3	-124,5	-123	1	-123,0	-123	0	89,94

Висновки до розділу

Для симуляції LoRaWAN існує декілька програмних пакетів. Розглянуті вище п'ять симуляторів підтримують протокол LoRaWAN і можуть моделювати мережу як послідовність дискретних подій у часовій області. Це дозволяє симуляторам переключатися на наступну подію, якщо дві послідовні події не змінюються, тому систему не потрібно постійно контролювати. Що стосується мов програмування, які використовуються в реалізаціях симуляторів, усі симулятори розроблені на добре відомих і підтримуваних середовищах програмування спільноти.

Це дуже важливо, оскільки фахівець може швидко розширити можливості симулятора за допомогою реалізації нових модулів як розширень для існуючих симуляторів (наприклад, розширити нові мережеві протоколи або включити додаткові інструменти в поточне середовище). C++ використовується для FloRa; Matlab використовується для PhySimulator; Для LoRaSim використовується Python; для модуля Ns-3 LoRaWAN використовується реалізація C++ і Python.

Моделювання мереж LoRa важливе, й на сьогодні вже є програмні рішення які допомагають у вирішенні проблем, які можуть виникнути під час розгортання, але варто звернути увагу й використовувати коефіцієнт обладнання, щоб отримані дані з симуляції відображалась наближено до реальних.

У бібліотеці FLoRa є суттєва похибка в моделі поширення сигналу й у даній роботі зроблено спробу прибрати цю похибку. Використавши дані отриманні в експерименті, вдалось вивести значення коефіцієнту обладнання й цим поліпшити отримані результати симуляції, що підтверджується

Варто зазначити, що моделювання показало похибки у вимірюванні, що проводилось експериментально, вона виникла через відбиття від фасаду будівлі сигналів, що призвело до накладання випромінення антени базової станції й отримання вищих значень потужності отриманого сигналу кінцевим вузлом.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Мережі передачі даних відіграють вирішальну роль у забезпеченні зв'язку між пристроями Інтернету речей. Серед найпоширеніших з них можна відмітити технології LoRa, NB-IoT та Sigfox.

LoRa – це технологія бездротового зв'язку з низьким енергоспоживанням і великим радіусом дії, яка призначена для підключення пристроїв IoT на великій території. Вона ідеально підходить для додатків, які вимагають низької швидкості передачі даних і тривалого часу автономної роботи, таких як "розумні міста" або "розумні будинки".

У експерименті необхідно враховувати нелінійність амплітудної характеристики приймача та середовище вимірювання під час вимірювання вхідної потужності за допомогою даних RSSI. Запропонована методика визначення реальної вхідної потужності приймача LoRa на основі значень RSSI розглядає таку нелінійність комплексно, використовуючи зміщення між значеннями RSSI та вхідною потужністю приймача. Недоліком цього підходу є вплив перешкод.

В результаті вимірювань ослаблення сигналу та відповідних розрахунків отримано середні значення коефіцієнтів K для трьох типів мікросхем LoRa, SX1276/77/78/79 та SX1280/1, на частотах 433 МГц, 868 МГц та 2,4 ГГц для різних значень коефіцієнта поширення SF. Використання цих коефіцієнтів дозволяє оцінити втрати на шляху з точністю, достатньою для оціночних розрахунків.

Розглянуто програмне забезпечення для симуляції мереж OMNeT++ та пакет FLoRa у якому проводилось моделювання мережі й вимірювання RSSI. Отримані результати важливі у розробці та розгортанні мереж LoRa і дозволяють зекономити час та отримати можливість побачити слабкі сторони проектування.

Моделювання показало похибки у вимірюванні експериментально через відбиття від фасаду будівлі сигналів, що призвело до накладання випромінення антени базової станції й отримання вищих значень потужності отриманого сигналу кінцевим вузлом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Capter 1. What is a Network? Режим доступу: <https://fcit.usf.edu/network/chap1/chap1.htm> (дата звернення 04.05.2023)
2. What are the Data Transmission Modes in a network? Режим доступу: <https://afteracademy.com/blog/what-are-the-data-transmission-modes-in-a-network/> (дата звернення 29.04.2023)
3. Wireless Sensor Network (WSN) Режим доступу: <https://www.geeksforgeeks.org/wireless-sensor-network-wsn/> (дата звернення 06.05.2023)
4. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *Science Direct*:Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061> (дата звернення: 06.05.2023)
5. Mobile IoT guide How NB-IoT & LTE-m are helping the IoT take off. Режим доступу: <https://iot.telekom.com/en/downloads/mobile-iot-guide>. (дата звернення: 07.05.2023)
6. Sigfox Technology – Make Things Come Alive Режим доступу: <https://www.daviteq.com/blog/en/sigfox-technology-make-things-come-alive/> (дата звернення: 06.05.2023)
7. Allen C. Newell, Near Field Antenna Measurement Theory, Planar, Cylindrical and Spherical, Nearfield Systems 1974
8. Friis Free Space Propagation Model. Режим доступу: <https://www.gaussianwaves.com/2013/09/friss-free-space-propagation-model/> (дата звернення: 29.04.2023)
9. T. S. Rappaport, Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 2002.
10. Yurii Onykienko; Pavlo Popovych; Roman Yaroshenko; Anastasiia Mitsukova; Anna Beldyagina; Yuliia Makarenko Using RSSI Data for LoRa Network Path Loss Modeling IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) 2022

11. Log Distance Path Loss або Log Normal Shadowing Model Режим доступу: <https://www.gaussianwaves.com/2013/09/log-distance-path-loss-or-log-normal-shadowing-model/> (дата звернення: 21.04.2023)
12. T. S. Rappaport et al. Wireless communications: principles and practice, volume 2. Prentice Hall PTR New Jersey, 1996
13. Martin Bor, Utz Roedig, Thiemo Voigt Juan M. Alonso: Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?, 2016
14. S. Capkun, M. Hamdi, and J.-P. Hubaux. Gps-free positioning in mobile ad-hoc networks. Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Volume 9:9008, 2001. Location
15. S. Nawaz and S. Jha. Collaborative localization for wireless sensor networks. In IEEE PIMRC, Athens, Greece, September 2007.
16. A. Ward, A. Jones, and A. Hopper. A new location technique for the active office. IEEE Personal Communications, 4:42–47, October 1997.
17. A. Magnani and K. Leung. Self-organized, scalable gpsfree localization of wireless sensors. In IEEE WCNC, pages 3798–3803, Hong Kong, China, 2007.
18. H. T. Friis. A note on a simple transmission formula. Proceedings of the IRE, 34(5):254 – 256, May 1946.
19. A. Awad, T. Frunzke, and F. Dressler. Adaptive distance estimation and localization in wsn using rssi measures. In Proceedings of the 10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools, pages 471–478, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society.
20. A. T. Parameswaran, M. I. Husain, and S. Upadhyaya. Is rssi a reliable parameter in sensor localization algorithms- an experimental study. In Field Failure Data Analysis Workshop, Niagara Falls, USA, September 2009.
21. Karel Heurtefeux, Fabrice Valois Is RSSI a good choice for localization in Wireless Sensor Network? 2012 26th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications
22. WIRELESS & SENSING PRODUCTS DATASHEET SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver Rev. 7 - May 2020.

23. R. M. Sandoval, A. Garcia-Sanchez and J. Garcia-Haro, "Improving RSSI-Based Path-Loss Models Accuracy for Critical Infrastructures: A Smart Grid Substation Case-Study," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 5, pp. 2230-2240, May 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2774838.
24. Посібник з моделювання OMNeT++ версії 6.0 Режим доступу: <http://omnetpp.org> (дата звернення: 26.04.2023)
25. Технічні статті OMNeT++, Частина 1 Початок роботи Режим доступу: <https://docs.omnetpp.org/tutorials/tictoc/part1/> (дата звернення: 27.04.2023)
26. What is FLoRA? Режим доступу: <https://flora.aalto.fi/> (дата звернення: 08.05.2023)
27. Usage. Режим доступу: <https://flora.aalto.fi/howto/usage/> (дата зввернення: 08.05.2023)
28. Martin Bor, Utz Roedig Thiemo Voigt Juan M. Alonso Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale? MSWiM '16: Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems November 2016 Pages 59–67
29. SX1280/SX1281 Long Range, Low Power, 2.4 GHz Transceiver with Ranging Capability S, Data Sheet Rev 3.2 DS.SX1280-1.W.APP March 2020
30. ESP32 Datasheet, Espressif Systems October 8, 2016
31. Ruben M. Sandoval, Antonio-Javier Garcia-Sanchez and Joan Garcia-Haro, Improving RSSI-based path-loss models accuracy for critical infrastructures: a Smart Grid substation case-study, Journal of LATEX class files, vol. 14, no. 8, august 2015
32. L. Tang, K. C. Wang, Y. Huang, and F. Gu, "Channel Characterization and Link Quality Assessment of IEEE 802.15.4-Compliant Radio for Factory Environments," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 3, no. 2, pp. 99–110, may 2007.
33. D. Capriglione, L. Ferrigno, E. D'Orazio, V. Paciello, and A. Pietrosanto, "Reliability analysis of RSSI for localization in small scale WSNs," in 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, may 2012, pp. 935–940.

34. Y. Chen and A. Terzis, On the Mechanisms and Effects of Calibrating RSSI Measurements for 802.15.4 Radios. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 256–271.
35. D. Konings, N. Faulkner, F. Alam, F. Noble, and E. Lai, “Do RSSI values reliably map to RSS in a localization system?” in 2017 2nd Workshop on Recent Trends in Telecommunications Research (RTTR), feb 2017, pp. 1–5.
36. G. Lui, T. Gallagher, B. Li, A. G. Dempster, and C. Rizos, “Differences in RSSI readings made by different Wi-Fi chipsets: A limitation of WLAN localization,” in 2011 International Conference on Localization and GNSS, ICL-GNSS 2011, 2011, pp. 53–57.
37. Mukarram A. M. Almuahaya, Waheb A. Jabbar, Noorazliza Sulaiman and Suliman Abdulmalek A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions Electronics 2022, 11, 164 p.
38. Bor, M.C.; Roedig, U.; Voigt, T.; Alonso, J.M. Do LoRa low-power wide-area networks scale? In Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, Malta, Malta, 13–17 November 2016; pp. 59–67.

ДОДАТОК А

SUMMARY

One of the components of IoT is radio frequency technologies, the most popular technologies now. Low energy consumption and long-range networks include LPWAN networks. The LoRaWAN network is one of the most popular wireless communication technologies, which provides long-range and efficient data transmission over long distances with minimal energy consumption. However, in order to ensure the optimal operation of the LoRaWAN network, it is necessary to take into account the specifics of the hardware used. Data networks play a critical role in ensuring communication between IoT devices. LoRa, NB-IoT and Sigfox technologies can be noted among the most common of them.

The first section presents of comparing these networks, it should be noted that LoRa technology has several advantages over NB-IoT and Sigfox. It provides greater range than NB-IoT and offers greater flexibility and scalability than Sigfox. LoRa networks can also be deployed in a variety of environments and can support a large number of devices, making them ideal for many IoT applications.

In the second section presents the RSS and RSSI parameters are considered. An element that is important in modern transceivers and is used to measure the value of the power of the received signal. But this value depends on the manufacturer of microcircuits, so it is proposed to consider the structure of the LoRa controller in detail in order to determine exactly which in this way RSSI is measured and find the hardware factor K.

In the third section, we describe the experiment. It was carried out on two LoRa modules. The results show that each transceiver has its own unique equipment factor. It also depends on SF

In the fourth section, Disassembled OMNeT++ flexible software and FLoRa package in which network simulation and RSSI measurements were performed. Received data from a certain region in the development of the deployment of such networks and save time and too visible design weaknesses.

The simulation showed errors in the experimental measurement due to the reflection of the building signals from the facade, which led to the overlap of the radiation of the base

station antenna and the reception of higher values of the power of the received signal by the final node.

ДОДАТОК Б

Налаштування .ini файлу симуляції

[General]

```
network = flora.simulations.LoRaNetworkTest
output-vector-file = ../results/n100-gw1-s${runnumber}.ini.vec
**.maxTransmissionDuration = 4s
**.energyDetection = -110dBm

#cmdenv-autoflush = true
#cmdenv-status-frequency = 10000000s
#cmdenv-express-mode = false
#cmdenv-output-file = cmd_env_log.txt
**.vector-recording = true

rng-class = "cMersenneTwister"
**.loRaGW[*].numUdpApps = 1
**.loRaGW[0].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[0].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[0].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[0].packetForwarder.indexNumber = 0

**.networkServer.numApps = 1
**.networkServer.**.evaluateADRinServer = true
**.networkServer.app[0].typename = "NetworkServerApp"
**.networkServer.app[0].destAddresses = "loRaGW[0]"
**.networkServer.app[0].destPort = 2000
**.networkServer.app[0].localPort = 1000
**.networkServer.app[0].adrMethod = ${"avg"}

**.numberOfPacketsToSend = 0 #${numberOfPackets = 200..5000 step 200} #100 #obviously 0 means
infinite number of packets
sim-time-limit = 6h
simtime-resolution = -11
repeat = 5

**.timeToFirstPacket = exponential(1000s)
**.timeToNextPacket = exponential(1000s)
**.alohaChannelModel = false #true

#nodes features
**.loRaNodes[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaNodes[*]**.evaluateADRinNode = true
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaBW = 125 kHz
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaCR = 4
**.loRaNodes[*].numApps = 1
**.loRaNodes[*].app[0].typename = "SimpleLoRaApp"

#gateway features
**.LoRaGWNic.radio.iAmGateway = true
**.loRaGW[*]**.initFromDisplayString = false

#power consumption features
**.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energyConsumer.typename = "LoRaEnergyConsumer"
**.loRaNodes[*]**.energySourceModule = "^IdealEpEnergyStorage"
**.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energyConsumer.configFile =
xmldoc("../energyConsumptionParameters.xml")

#general features
**.sigma = 2.65 # default 3.57, parameters taken from paper "LoRa Evaluation for University
Campus in Urban Conditions"
```

```

**.gamma = 2.2 # change in the project in accordance with the article "Using RSSI Data for
LoRa Network Path LossModeling"
**.d0 = 10m # change in the project in accordance with the article "Using RSSI Data for LoRa
Network Path LossModeling"
**.constraintAreaMinX = 0m
**.constraintAreaMinY = 0m
**.constraintAreaMinZ = 0m
**.constraintAreaMaxZ = 0m

LoRaNetworkTest.**.radio.separateTransmissionParts = false
LoRaNetworkTest.**.radio.separateReceptionParts = false

**.ipv4Delayer.config = xmldoc("../cloudDelays.xml")
**.radio.radioMediumModule = "LoRaMedium"
**.LoRaMedium.pathLossType = "LoRaLogNormalShadowing"
#**.LoRaMedium.pathLossType = "LoRaPathLossOulu"
**.minInterferenceTime = 0s
**.displayAddresses = false

# cache features
# **.LoRaMedium.mediumLimitCacheType = "LoRaMediumCache"
# **.LoRaMedium.rangeFilter = "communicationRange"
# **.LoRaMedium.neighborCacheType = "LoRaNeighborCache"
# **.LoRaMedium.neighborCache.range = 546m
# **.LoRaMedium.neighborCache.refillPeriod = 3000s
**.numberOfNodes = 1
**.numberOfGateways = 1
**.constraintAreaMaxX = 2376.0m
**.constraintAreaMaxY = 1090.0m
**.loRaGW[0]**.initialX = 100.00m
**.loRaGW[0]**.initialY = 100.00m
output-scalar-file = ../results/n100-gw1-s${runnumber}.ini.sca
**.loRaNodes[0]**.initialX = 100.00m
**.loRaNodes[0]**.initialY = 100.00m + 1m # 1, 1.58, 2.51, 3.89, 6.30, 10, 15.84, 25.11, 50,
100, 188, 251, 398, 631, 864

**.loRaNodes[0]**.initialLoRaSF = 7 # 7, 9, 12
**.loRaNodes[0]**.initialLoRaTP = 21dBm # 17+2+2

```

ДОДАТОК В

Програмний код моделі поширення сигналу

```
#include "LoRaLogNormalShadowing.h"
#include "inet/common/INETMath.h"

namespace flora {

Define_Module(LoRaLogNormalShadowing);

LoRaLogNormalShadowing::LoRaLogNormalShadowing()
{
}

void LoRaLogNormalShadowing::initialize(int stage)
{
    FreeSpacePathLoss::initialize(stage);
    if (stage == INITSTAGE_LOCAL) {
        sigma = par("sigma");
        gamma = par("gamma");
        d0 = m(par("d0"));
    }
}

std::ostream& LoRaLogNormalShadowing::printToStream(std::ostream& stream, int level, int evFlags) const
{
    stream << "LoRaLogNormalShadowing";
    if (level <= PRINT_LEVEL_TRACE)
        stream << ", alpha = " << alpha
            << ", systemLoss = " << systemLoss
            << ", sigma = " << sigma;
    return stream;
}

double LoRaLogNormalShadowing::computePathLoss(mps propagationSpeed, Hz frequency, m distance)
const
{
    // parameters taken from paper "Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?"
    //double PL_d0_db = 127.41;
    double PL_d0_db = 51.21 + 47; // FSPL(10m) + K (parameters taken from paper "Using RSSI
    Data for LoRa Network Path Loss Modeling") K(SF7)= 47, K(SF9, SF12) = 50
    //double PL_db = PL_d0_db + 10 * gamma * log10(unit(distance / d0).get()) + normal(0.0,
    sigma);
    double PL_db = PL_d0_db + 10 * gamma * log10(unit(distance / d0).get()) + normal(0.0,
    sigma);
    return math::dB2fraction(-PL_db);
}

m LoRaLogNormalShadowing::computeRange(W transmissionPower) const
{
    // parameters taken from paper "Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?"
    double PL_d0_db = 127.41;
    double max_sensitivity = -137;
    double trans_power_db = round(10 * log10(transmissionPower.get()*1000));
    EV << "LoRaLogNormalShadowing transmissionPower in W = " << transmissionPower << " in dBm
    = " << trans_power_db << endl;
    double rhs = (trans_power_db - PL_d0_db - max_sensitivity)/(10 * gamma);
    double distance = d0.get() * pow(10, rhs);
    return m(distance);
}}
```